

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky

Laboratorní úloha pro RC Didactic
Laboratory measurement for RC Didactic

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky

Zadání bakalářské práce

Student: **Ondřej Rucký**
Studijní program: B2649 Elektrotechnika
Studijní obor: 3907R001 Elektroenergetika
Téma: Laboratorní úloha pro RC Didactic
Laboratory measurement for RC Didactic

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

- o Popis modulů pro provoz motorgenerátoru.
- o Popis modulů pro provoz transformátoru.
- o Rozšíření laboratorní úlohy Motorgenerátoru.
- o Vytvoření laboratorní úlohy Transformátor.
- o Závěr.

Seznam doporučené odborné literatury:

- o Hlava, J.: PID regulátory – jejich vlastnosti, modifikace a číslicová implementace. Liberec: Technická univerzita v Liberci
- o Máslo, K. a kol.: Řízení a stabilita elektrizační soustavy, AEM 2013, ISBN 987-80-260-44671-1
- o Čermák, T., Keppert S.: Elektrické stroje I. - Transformátory, VŠB, Ostrava 1984
- o Výukový systém rc2000 – μ LAB, Regulační technika. RC DIDACTIC SYSTEMS
- o Další podle pokynů vedoucího práce


Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Radomír Goňo, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2018

Datum odevzdání: 30.04.2019




prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.
vedoucí katedry


prof. Ing. Pavel Brandštetter, CSc.
děkan fakulty

*„Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární
prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.“*

Datum: 30.4.2019


.....
Podpis

Poděkování:

„Tímto bych chtěl poděkovat panu doc. Ing. Radomíru Goňovi, Ph.D. za konzultace, rady a připomínky, které mi poskytl při řešení mé bakalářské práce.“

Abstrakt

Cílem této bakalářské práce je vytvoření vzoru zadání, sestavení a vypracování dvou laboratorních úloh, které využívají stavebnice RC Didactic. První část práce se zabývá laboratorní úlohou Transformátor, ve které je odvození principu transformátoru, definování magnetického pole v látkovém prostředí a popis způsobu měření hysterezních smyček a amplitudové permeability. Dále jsou v této části popisy modulů použitých pro měření úlohy a zadání a vypracování laboratorní úlohy Transformátor. Druhá část se věnuje rozšíření laboratorní úlohy Motorgenerátor. Jsou zde popsány způsoby řízení otáček stejnosměrného motoru s cizím buzením. Dále jsou uvedeny popisy modulů pro měření úlohy a vytvoření zadání a vypracování laboratorní úlohy Motorgenerátor, která se zabývá měřením mechanických charakteristik stejnosměrného motoru s permanentními magnety.

Klíčová slova

Laboratorní úloha, transformátor, magnetismus, motor

Abstract

The aim of this bachelor thesis is to create a exemplar of assignment, compilation and elaboration of two laboratory measurement, which are use RC Didactic kit. The first part of the thesis deals with the laboratory measure Transformer, in which is derived the principle of the transformer, the definition of the magnetic field in the material surroundings and the description of the measurement of hysteresis loops and amplitude permeability. Then there are module descriptions used for laboratory measurement, and exemplar and the elaboration of the laboratory measurement Transformer. The second part deals with the extension of the laboratory measurement Motor-generator. There are described ways of controlling the DC shunt motor. Then there are module descriptions used for laboratory measurement, and exemplar and the elaboration of the laboratory measurement Motor-generator, which deals with the measurement of mechanical characteristics of DC motor with permanent magnet.

Keywords

Laboratory measurement, transformer, magnetism, electric motor

Obsah

1 Seznam použitých symbolů a zkratek	7
2 Seznam ilustrací a tabulek	8
3 Úvod	10
4 Laboratorní úloha Transformátor	11
4.1 Teoretický rozbor	11
4.1.1 Transformátor	11
4.1.2 Magnetismus	16
4.1.3 Magnetická měření	21
4.2 Moduly pro provoz transformátoru	23
4.3 Vzor zadání laboratorní úlohy Transformátor	27
4.4 Vypracování laboratorní úlohy Transformátor	29
5 Laboratorní úloha Motorgenerátor	35
5.1 Teoretický rozbor	35
5.2 Moduly pro provoz motorgenerátoru	37
5.3 Vzor zadání laboratorní úlohy Motorgenerátor	42
5.4 Vypracování laboratorní úlohy Motorgenerátor	44
6 Závěr	47
Literatura	48

1 Seznam použitých symbolů a zkratk

B	Magnetická indukce (T)
C	Kapacita (F)
E	Efektivní hodnota elektromotorického napětí (V)
H	Intenzita magnetického toku ($A \cdot m^{-1}$)
I	Efektivní hodnota elektrického proudu (A)
J	Magnetická polarizace (T)
Jc	Celkový moment setrvačnosti ($kg \cdot m^2$)
L	Indukčnost (H)
M	Moment (Nm)
N	Počet závitů
R	Elektrický odpor (Ω)
S	Obsah (m^2)
U	Efektivní hodnota elektrického napětí (V)
Z	Impedance (Ω)
\mathcal{E}	Elektromotorické napětí (V)
Φ	Magnetický indukční tok (Wb)
f	frekvence (Hz)
i	Okamžitá hodnota elektrického proudu (A)
l	Délka (m)
n	Otáčky (min^{-1})
p	Převod
t	čas (s)
u	Okamžitá hodnota elektrického napětí (V)
μ	Permeabilita ($H \cdot m^{-1}$)
φ	Fázový posuv
χ_m	Magnetická susceptibilita
ω	Úhlová frekvence ($rad \cdot s^{-1}$)

2 Seznam ilustrací a seznam tabulek

<i>Obr. 1</i>	<i>Typy uspořádání vinutí na jádře</i>	11
<i>Obr. 2</i>	<i>Zobrazení typů magnetických obvodů</i>	12
<i>Obr. 3</i>	<i>Jednofázový zatížený transformátor</i>	14
<i>Obr. 4</i>	<i>Vznik obvodového proudu u magneticky polarizovaného magnetického materiálu</i>	16
<i>Obr. 5</i>	<i>Pole magnetické indukce vzduchové cívky</i>	17
<i>Obr. 6</i>	<i>Magnetický materiál v poli jednoho závitů vzduchové cívky</i>	17
<i>Obr. 7</i>	<i>Znázornění hysterezní smyčky</i>	20
<i>Obr. 8</i>	<i>Zobrazení modulu transformátoru</i>	23
<i>Obr. 9</i>	<i>Zobrazení modulu generátoru funkcí</i>	24
<i>Obr. 10</i>	<i>Zobrazení modulu výkonového zesilovače</i>	25
<i>Obr. 11</i>	<i>Schéma zapojení laboratorní úlohy Transformátor</i>	27
<i>Obr. 12</i>	<i>Zobrazení dynamických hysterezních magnetického obvodu transformátoru při napájecím napětí 1, 2,5, 4, 5, 6 a 7 V</i>	30
<i>Obr. 13</i>	<i>Zobrazení průběhů magnetizačního proudu a magnetické indukce měřeného transformátoru při napájecím napětí 1, 2,5, 4, 5, 6 a 7 V</i>	31
<i>Obr. 14</i>	<i>Změřená magnetizační amplitudová charakteristika</i>	33
<i>Obr. 15</i>	<i>Průběh amplitudové permeability magnetického obvodu transformátoru</i>	33
<i>Obr. 16</i>	<i>Schéma stejnosměrného motoru s cizím buzením</i>	35
<i>Obr. 17</i>	<i>Mechanické charakteristiky DC motoru s cizím buzením: a) změna napájecího napětí U_a, b) změna odporu kotvy R_a, c) změna magnetického toku ?</i>	36
<i>Obr. 18</i>	<i>Zobrazení modulu motorgenerátoru</i>	37
<i>Obr. 19</i>	<i>Zobrazení modulu programovatelného DC zdroje</i>	39
<i>Obr. 20</i>	<i>Zobrazení modulu DC & AC voltmetru</i>	40
<i>Obr. 21</i>	<i>Zobrazení modulu odporové dekády</i>	41
<i>Obr. 22</i>	<i>Schéma zapojení laboratorní úlohy Motorgenerátor</i>	42
<i>Obr. 23</i>	<i>Změřené mechanické charakteristiky při změně napájecího napětí U_a</i>	46
<i>Obr. 24</i>	<i>Změřené mechanické charakteristiky při změně odporu kotvy R_a</i>	46

<i>Tab. 1</i>	<i>Parametry modulu transformátoru</i>	23
<i>Tab. 2</i>	<i>Parametry modulu generátoru funkcí</i>	24
<i>Tab. 3</i>	<i>Parametry modulu výkonového zesilovače</i>	25
<i>Tab. 4</i>	<i>Naměřené hodnoty při měření hysterezních smyček</i>	29
<i>Tab. 5</i>	<i>Skutečné přepočítané hodnoty intenzit magnetického pole a magnetických indukci</i>	29
<i>Tab. 6</i>	<i>Naměřené a vypočítané hodnoty při měření magnetizační amplitudové charakteristiky</i>	32
<i>Tab. 7</i>	<i>Parametry modulu motorgenerátoru</i>	38
<i>Tab. 8</i>	<i>Parametry modulu programovatelného DC zdroje</i>	39
<i>Tab. 9</i>	<i>Parametry modulu DC & AC voltmetru</i>	40
<i>Tab. 10</i>	<i>Parametry modulu odporové dekády I</i>	41
<i>Tab. 11</i>	<i>Naměřené hodnoty při změně napájecího napětí U_a</i>	44
<i>Tab. 12</i>	<i>Naměřené hodnoty při změně odporu kotvy R_a</i>	44

3 Úvod

Cílem práce je vytvoření dvou laboratorních úloh za využití stavebnice RC Didactic.

Kapitola 4 se věnuje laboratorní úloze Transformátor. Tato kapitola je rozdělena do čtyř podkapitol a je hlavní náplní práce. Kapitola 4.1 se zabývá teoretickým rozboru a je rozdělena do tří částí. V první části je uvedeno obecné pojednání o konstrukci transformátoru a vlastnostech elektrického a magnetického obvodu. V další části následuje popis principu transformátoru a odvození napěťových rovnic ze zákona elektromagnetické indukce. Třetí část tvoří popis chování magnetického pole v látkovém prostředí, definování pojmu magnetická susceptibilita a popis magnetických materiálů podle tohoto parametru. Je zde uveden také popis hysterezní smyčky a pojednání o způsobu zobrazení dynamických hysterezních smyček na osciloskopu a měření souvisejících parametrů jako jsou intenzita magnetického pole, koercitivní intenzita magnetického pole, magnetická indukce a remanentní magnetická indukce. Dále je uveden popis měření amplitudové magnetizační charakteristiky a výpočtu amplitudové permeability. Kapitola 4.2 tvoří popis modulů použitých pro měření této laboratorní úlohy. Kapitola 4.3 obsahuje vzor zadání laboratorní úlohy Transformátor. Kapitola 4.4 se zabývá samotným vypracováním laboratorní úlohy. Úlohu tvoří měření dynamických hysterezních křivek, měření amplitudové magnetizační charakteristiky a výpočet amplitudové permeability

Kapitola 5 se věnuje laboratorní úloze Motorgenerátor a je rozdělena do čtyř podkapitol. Kapitola 5.1 uvádí možnosti řízení otáček stejnosměrného motoru s cizím buzením. Kapitola 5.2 obsahuje popis modulů použitých k měření této úlohy. Kapitola 5.3 tvoří vzor zadání laboratorní úlohy Motorgenerátor. V kapitole 5.4 je obsaženo vypracování laboratorní úlohy, kterou tvoří měření mechanických charakteristik stejnosměrného motoru s permanentními magnety při řízení otáček změnou napětí a změnou hodnoty odporu kotvy.

4 Laboratorní úloha Transformátor

4.1 Teoretický rozbor

4.1.1 Transformátor

Konstrukce transformátoru

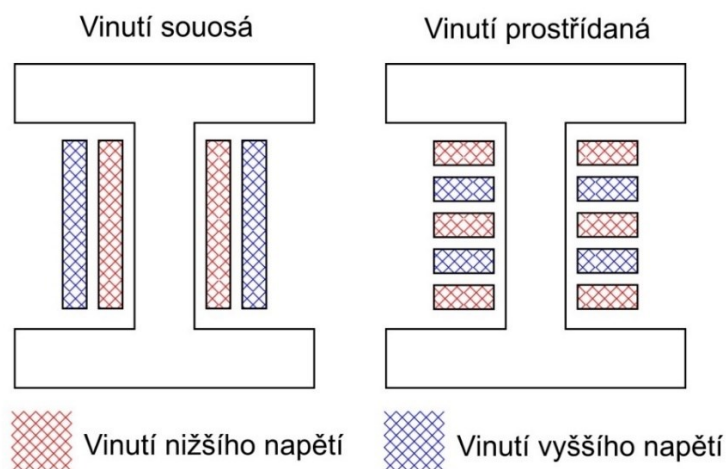
Transformátor je netočivý elektrický stroj, který pomocí elektromagnetické indukce převádí střídavý proud a napětí o určité hodnotě na střídavý proud a napětí o jiné hodnotě. Přenos elektrické energie transformátorem je možný v obou směrech.

Podle využití v elektrotechnice se transformátory rozdělují na:

- Energetické – přenos a rozvod elektrické energie; velké výkony
- Pecové – napájení obloukových a odporových pecí; řízení napětí v širokém rozsahu
- Svařovací – nízké napětí naprázdno; vysoký proud
- Spouštěcí – spouštění velkých asynchronních elektromotorů
- Měničové – napájení polovodičových měničů
- Oddělovací – galvanické oddělení obvodů
- Zkušební a měřicí – zkoušky a ověřování elektrické pevnosti izolátorů, elektrických strojů, kabelů; měřicí transformátory napětí a proudu

Transformátor je tvořen elektrickým obvodem a magnetickým obvodem.

Elektrický obvod je tvořen vinutím a svorkami. Vstupní vinutí se označuje jako primární a výstupní vinutí jako sekundární. U transformátorů se používá jako materiál vinutí nejčastěji měď, v některých případech hliník (např. zalévané transformátory). Podle způsobu umístění vinutí na jádře se vinutí rozlišují na sousá (válcová) a vnutí prostřídaná (kotoučová) (viz Obr. 1). S ohledem na izolaci se vinutí vyššího napětí umísťuje nejčastěji vně. Hlavními požadavky na vinutí jsou mechanická pevnost (montáž, elektrodynamické síly při zkratech), elektrická pevnost (namáhání izolace střídavým elektrickým polem při provozu i při přepětích, elektrická pevnost se prověřuje zkouškami), odolnost proti tepelnému namáhání (teplota izolace nesmí překročit hodnoty, které jsou dány třídou izolace) a ohled na výrobní a provozní náklady.



Obr. 1 Typy uspořádání vinutí na jádře [1]

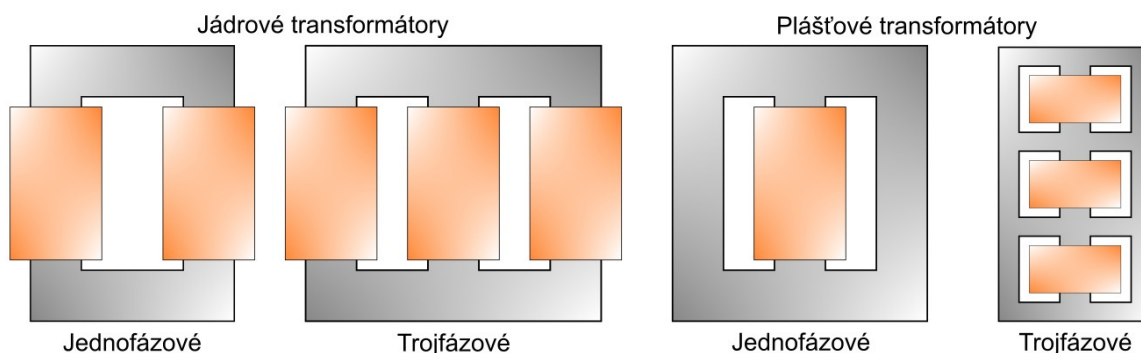
Jádro transformátoru tvoří magnetický obvod, kterým se uzavírá magnetický tok. Jádra jsou tvořena souborem tenkých transformátorových plechů (tloušťky nejčastěji 0,35 mm, případně 0,5 mm) a zhotovují se z feromagnetických nebo ferimagnetických materiálů. Základním požadavkem pro výběr vhodných magnetických materiálů je nejen vysoká relativní permeabilita, ale i nízké ztráty. V magnetickém obvodu vznikají ztráty hysterezní a ztráty vířivými proudy.

Hysterezní ztráty vznikají cyklickým přemagnetováním materiálu jádra vlivem působení proměnného elektromagnetického pole, a tím se energie magnetického pole tak přeměňuje v teplo. Snížení hysterezních ztrát se docílí použitím magneticky měkkých materiálů s nízkým koercitivním polem (viz kap. 4.1.2.2).

Ztráty vířivými proudy jsou důsledkem zákona elektromagnetické indukce (viz kap. 4.1.1.2), a vznikají ve vodivém prostředí vždy, pokud v něm dochází ke změnám magnetického pole. V materiálu jádra tak vlivem vířivých proudů vzniká nežádoucí Jouleovo teplo. Pro snížení ztrát vířivými proudy je třeba volit materiály s co nejnížší elektrickou vodivostí. Snížení ztrát vířivými proudy lze také docílit tím, že potřebný průřez jádra se skládá z tenkých transformátorových plechů, které jsou vzájemně elektricky izolovány.

Vlivem vzniklého ztrátového tepla se mění magnetické vlastnosti jádra a je ohrožována elektrická izolace vinutí. Zvýšením přípustného oteplení se zvyšují i nároky na izolaci vinutí.

Magnetický obvod se podle konstrukce rozlišuje na dva druhy: jádrový a plášťový (viz Obr. 2).



Obr. 2 Zobrazení typů magnetických obvodů [2]

Elektromagnetická indukce

Elektromagnetická indukce je jev, při kterém v uzavřeném elektrickém obvodu tvořeným smyčkou teče proud, pokud v jeho okolí dochází ke změnám magnetického pole. Konkrétně tento jev může nastat ve třech případech, pokud se začne pohybovat smyčka vůči magnetickému poli, pokud se začne pohybovat zdroj magnetického pole vůči smyčce, nebo pokud smyčka i zdroj magnetického pole setrvávají v klidu, ale začne se měnit magnetické pole uvnitř smyčky. Na nositele proudu ve vodiči smyčky tedy působí ve všech třech případech síly, které jsou schopny vyvolat proud. Na základě experimentů s magnetickou indukcí bylo zjištěno, že pro vznik indukovaného elektromotorického napětí \mathcal{E}_F je určující změna celkového magnetického toku procházejícího plochou smyčky. Tím byl určen vztah mezi indukovaným elektromotorickým napětím a změnou celkového magnetického toku

$$\mathcal{E}_F(t) = - \frac{d\Phi}{dt}. \quad (4.1)$$

Vztah se též označuje jako zákon elektromagnetické indukce a zní: *Velikost indukovaného elektromotorického napětí je rovna velikosti časové derivace celkového magnetického toku smyčkou. Směr indukovaného proudu je vždy takový, že magnetické pole vytvořené tímto proudem se vždy snaží kompenzovat změny toku odpovědné za vznik indukovaného proudu. Znaménko mínus značí opačný směr indukovaného proudu (Lenzovo pravidlo).*

Princip transformátoru

Funkce transformátoru je založena na principu elektromagnetické indukce. Připojením střídavého napětí na svorky vstupního (primárního) vinutí, začne tímto vinutím téct magnetizační proud, který vyvolá v magnetickém obvodu transformátoru střídavý magnetický tok Φ . Za předpokladu dokonalého magnetického obvodu a rozpojeného výstupního (sekundárního) vinutí, je celý magnetický tok Φ spřažen s výstupním vinutím, ve kterém se indukuje elektromotorické napětí. Pokud vztah 4.1 popisoval indukované elektromotorické napětí v uzavřené smyčce, pak pro transformátor s N počtem závitů (smyčkami) lze napsat vztah pro elektromotorické napětí indukované v sekundárním vinutí

$$\mathcal{E}_2(t) = -N_2 \cdot \frac{d\Phi}{dt}. \quad (4.2)$$

Napětí na svorkách primárního vinutí je v rovnováze s indukovaným elektromotorickým napětím \mathcal{E}_1 , pokud se zanedbá úbytek napětí způsobený magnetizačním proudem na odporu primárního vinutí. Pak platí vztah

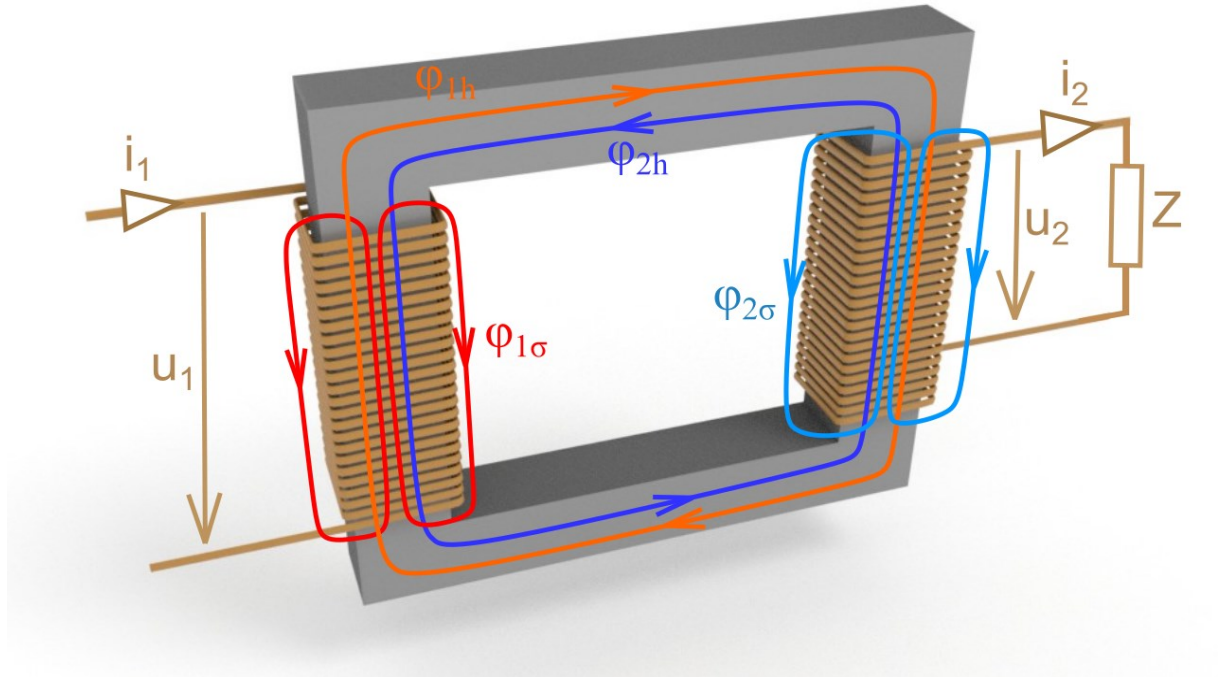
$$\mathcal{E}_1(t) = -N_1 \cdot \frac{d\Phi}{dt}. \quad (4.3)$$

Magnetický tok Φ_1 vyvolaný proudem tekoucím primárním vinutím je tvořen hlavním tokem Φ_{1h} , který se uzavírá jádrem a je spřažen se sekundárním vinutím, a rozptylovým tokem $\Phi_{1\sigma}$, který se uzavírá vinutím a vzduchem. Platí tedy

$$\Phi_1 = \Phi_{1h} + \Phi_{1\sigma}. \quad (4.4)$$

Připojením impedanční zátěže na svorky sekundárního vinutí je pak na těchto svorkách napětí u_2 , které má podle zákona elektromagnetické indukce a Lenzova pravidla takovou polaritu, aby proud i_2 vyvolal v sekundárním vinutí magnetický tok Φ_2 , který působí proti magnetickému toku Φ_1 . Obdobně jako ve výrazu 4.4 platí pro Φ_2

$$\Phi_2 = \Phi_{2h} + \Phi_{2\sigma} . \quad (4.5)$$



Obr. 3 Jednofázový zatížený transformátor

Podle 2.Kirchhofova zákona pak platí pro primární obvod tato napěťová rovnice

$$u_1 = R_1 i_1 + N_1 \cdot \frac{d}{dt} (\Phi_{1h} + \Phi_{1\sigma}) - N_1 \cdot \frac{d\Phi_{2h}}{dt} , \quad (4.6)$$

kde se závity primárního vinutí N_1 je spřažen celkový magnetický tok Φ_1 a zároveň proti němu působí hlavní magnetický tok sekundárního vinutí Φ_2 . Obdobně platí pro sekundární obvod tato napěťová rovnice

$$u_2 = -R_2 i_2 - N_2 \cdot \frac{d}{dt} (\Phi_{2h} + \Phi_{2\sigma}) + N_2 \cdot \frac{d\Phi_{1h}}{dt} . \quad (4.7)$$

Odpory R_1 a R_2 představují odpor primárního a sekundárního vinutí.

Matematickým úpravami lze napěťové rovnice převést do tvaru

$$u_1 = R_1 i_1 + N_1 \cdot \frac{d\Phi_{1\sigma}}{dt} + N_1 \cdot \frac{d}{dt} (\Phi_{1h} - \Phi_{2h}) \quad (4.8)$$

$$u_2 = -R_2 i_2 - N_2 \cdot \frac{d\Phi_{2\sigma}}{dt} + N_2 \cdot \frac{d}{dt} (\Phi_{1h} - \Phi_{2h}) . \quad (4.9)$$

Indukovaná elektromotorická napětí jsou pak dána těmito výrazy

$$\mathcal{E}_1 = N_1 \cdot \frac{d}{dt}(\Phi_{1h} - \Phi_{2h}) = N_1 \cdot \frac{d\Phi_\mu}{dt} \quad (4.10)$$

$$\mathcal{E}_2 = N_2 \cdot \frac{d}{dt}(\Phi_{1h} - \Phi_{2h}) = N_2 \cdot \frac{d\Phi_\mu}{dt}, \quad (4.11)$$

kde Φ_μ je výsledný skutečný magnetický tok.

Předpokladem je napět'ové buzení obvodu, pak má magnetický tok sinusový průběh

$$\Phi_\mu = \Phi_m \sin(\omega t + \varphi). \quad (4.12)$$

Dosazením výrazu 4.12 do výrazů 4.10 a 4.11 a následné matematické úpravě vznikají vztahy

$$\mathcal{E}_1 = N_1 \omega \Phi_m \cos(\omega t + \varphi) \quad (4.13)$$

$$\mathcal{E}_2 = N_2 \omega \Phi_m \cos(\omega t + \varphi). \quad (4.14)$$

Pro výpočet efektivní hodnoty indukovaných elektromotorických napětí pak lze psát

$$E_1 = \frac{\omega}{\sqrt{2}} N_1 \Phi_m = 4,44 N_1 \Phi_m f \quad (4.15)$$

$$E_2 = \frac{\omega}{\sqrt{2}} N_2 \Phi_m = 4,44 N_2 \Phi_m f. \quad (4.16)$$

Pro magnetický tok platí výraz

$$\Phi = \int_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S}. \quad (4.17)$$

Předpokládáme-li magnetický tok v celém průřezu magnetického obvodu stálý, platí vztah

$$\Phi = BS. \quad (4.18)$$

Dosazením vztahu 4.18 do rovnic 4.15 a 4.16 přechází tyto rovnice do tvaru

$$E_1 = \frac{\omega}{\sqrt{2}} N_1 \Phi_m = 4,44 N_1 BS f \quad (4.19)$$

$$E_2 = \frac{\omega}{\sqrt{2}} N_2 \Phi_m = 4,44 N_2 BS f. \quad (4.20)$$

Z těchto rovnic lze ze známých parametrů transformátoru vypočítat hodnotu indukované napětí.

Podílem rovnic 4.10 a 4.11 se zavede převod transformátoru,

$$\frac{\mathcal{E}_1}{\mathcal{E}_2} = \frac{N_1}{N_2} = p. \quad (4.21)$$

Při zanedbání úbytku napětí při chodu naprázdno, který je definován výrazem

$$R_1 i_{10} + N_1 \cdot \frac{d\Phi_{1\sigma}}{dt}, \quad (4.22)$$

se pak v praxi používá pro výpočet převodu výraz

$$p = \frac{U_1}{U_{20}}. \quad (4.23)$$

Což je poměr vstupního svorkového napětí a výstupního svorkového napětí při chodu naprázdno.

Při zanedbání ztrát musí platit rovnost zdánlivých výkonů na vstupu a výstupu transformátoru

$$U_1 I_1 = U_2 I_2. \quad (4.24)$$

Pak lze převod zatíženého transformátoru podle primárního a sekundárního proudu definovat výrazem

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{U_2}{U_1} = \frac{1}{p}. \quad (4.25)$$

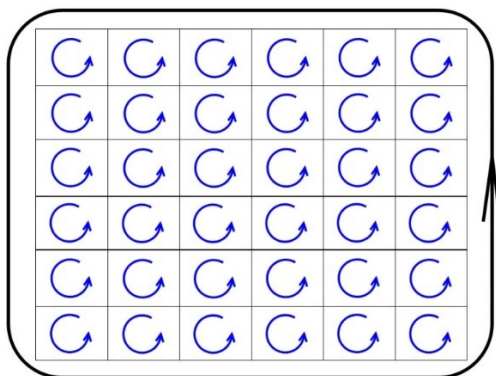
4.1.2 Magnetismus

Magnetické pole v látkovém prostředí

Pro popis magnetického pole v látkovém prostředí se vychází z Ampérova zákona ve vakuu.

$$\oint_l \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = \mu_0 I. \quad (4.26)$$

Vložením magnetického materiálu do magnetického pole, tvořeného cívku protékanou proudem (viz obr. 5 a 6), v něm vzniká vázaný proud, tzv. magnetizační proud I' . Tento proud si lze představit jako výsledný proud, tvořený smyčkami elementárních proudů jednotlivých atomů (viz obr. 4). Účinky proudů sousedních smyček se vzájemně ruší, výsledný proud teče po obvodu průřezu magnetického materiálu. Velikost magnetizačního proudu I' potom charakterizuje vektor magnetické polarizace \mathbf{J} . Magnetická polarizace popisuje schopnost magnetického materiálu stáčet magnetické momenty atomů a jejich částic do směru působícího magnetického pole a tím pak vytvářet pole vlastní.



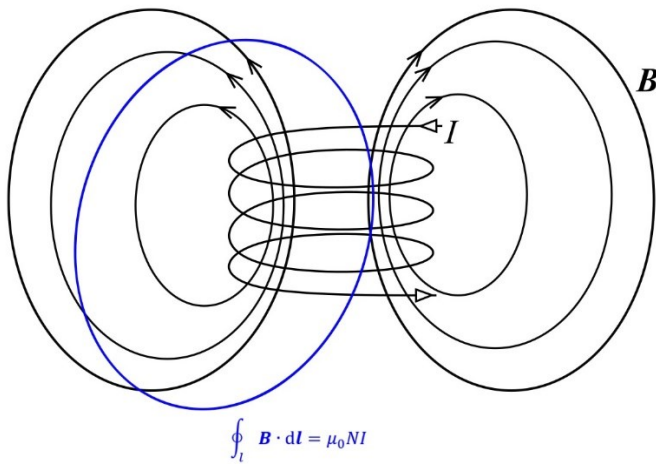
Obr. 4 Vznik obvodového proudu u magneticky polarizovaného magnetického materiálu

Na základě výše popsaných skutečností se Ampérův zákon ve vakuu upraví pro látkové prostředí do podoby

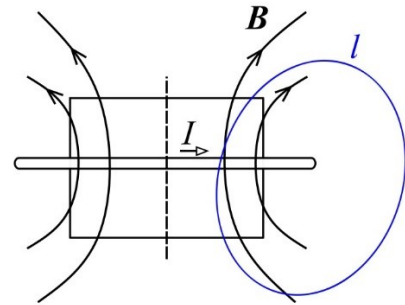
$$\oint_l \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = \mu_0(I + I') . \quad (4.27)$$

Magnetizační proud lze definovat pomocí magnetické polarizace výrazem [4]

$$I' = \int \frac{d\mathbf{I}'}{dl} \cdot d\mathbf{l} = \frac{1}{\mu_0} \int \mathbf{J} \cdot d\mathbf{l} . \quad (4.28)$$



Obr. 5 Pole magnetické indukce vzduchové cívky [4]



Obr. 6 Magnetický materiál v poli jednoho závitů vzduchové cívky [4]

Příspěvek je nenulový na té části dráhy l z celkové integrační cesty, která prochází magnetickým materiálem (viz obr. 6). Dosazením vztahu 4.28 do vztahu 4.27 vznikne vztah

$$\oint_l \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = \mu_0 I + \oint_l \mathbf{J} \cdot d\mathbf{l} . \quad (4.29)$$

Úpravou vzniká vztah

$$\oint_l \frac{\mathbf{B} - \mathbf{J}}{\mu_0} \cdot d\mathbf{l} = I . \quad (4.30)$$

Zavedením pomocného vektoru nahrazujícím výraz $(\mathbf{B} - \mathbf{J})/\mu_0$ vzniká nová veličina \mathbf{H} , zvaná intenzita magnetického pole.

$$\mathbf{H} = \frac{\mathbf{B} - \mathbf{J}}{\mu_0} . \quad (4.31)$$

Magnetická indukce v jádře, které je polarizováno intenzitou magnetického pole, je pak definována výrazem

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H} + \mathbf{J} . \quad (4.32)$$

Pro vakuum je magnetická polarizace nulová a platí

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H} . \quad (4.33)$$

Na základě výrazů 4.30 a 4.31 pak lze psát výraz

$$\oint_l \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = I , \quad (4.34)$$

ze kterého vyplývá, že hodnota dráhového integrálu intenzity magnetického pole je závislá jen na proudu protékajícím vodičem, který dráhu obepíná.

Pro magnetickou polarizaci platí [3]

$$\mathbf{J} = \mu_0 \chi_m \mathbf{H} . \quad (4.35)$$

Konstanta úměrnosti χ_m se nazývá magnetická susceptibilita látky.

Dosazením výrazu 4.35 do výrazu 4.32 pak vzniká výraz

$$\mathbf{B} = \mu_0 (1 + \chi_m) \mathbf{H} . \quad (4.36)$$

Veličina $\mu = \mu_0 (1 + \chi_m)$ se nazývá permeabilitou látky, veličina $\mu_r = 1 + \chi_m$ její relativní permeabilitou. Magnetická susceptibilita a relativní permeabilita jsou bezrozměrné veličiny. Permeabilita má rozměr a jednotku shodnou s konstantou μ_0 , konkrétně $\text{N} \cdot \text{A}^{-2}$.

V případě magneticky izotropních látek (magnetické vlastnosti jsou ve všech směrech stejné) je magnetická susceptibilita skalární veličina, tj. vektor magnetizace je rovnoběžný s vektorem intenzity magnetického pole.

Magneticky anizotropní látky mají směr vektoru magnetizace různý od směru vektoru intenzity magnetického pole (magnetické vlastnosti jsou různé v závislosti na směru). Magnetická susceptibilita je pak v tomto případě tenzor. Magnetická susceptibilita může nabývat kladných i záporných hodnot.

Magnetické materiály

Podle hodnoty magnetické susceptibility se materiály rozdělují na diamagnetické, paramagnetické, feromagnetické, ferimagnetické a antiferomagnetické. [5]

Diamagnetismus ($\chi < 0, \mu_r < 1$)

Magnetická susceptibilita nezávisí na teplotě ani na intenzitě magnetického pole. Dráhové a spinové momenty jsou vykompenzovány, výsledné magnetické momenty atomů jsou nulové. V přítomnosti magnetického pole vzniká v materiálu slabý magnetický moment, který působí proti vnějšímu magnetickému poli. Po zániku vnějšího magnetického pole tento moment zaniká.

Paramagnetismus ($\chi_m > 0, \mu_r > 1$)

Většina paramagnetických materiálů má závislost magnetické susceptibility na teplotě. Celkové magnetické momenty atomů nejsou nulové a jsou orientovány nepravidelně všemi směry. V přítomnosti magnetického pole se magnetické momenty atomu začnou stáčet ve směru působícího pole a materiál se jeví jako mírně zmagnetovaný. Po zániku vnějšího magnetického pole se momenty atomů vracejí do původního stavu a látka přestává být magnetická.

Feromagnetismus ($\chi_m \gg 0, \mu_r \gg 1$)

Feromagnetické materiály mají podobně jako u paramagnetických materiálů celkový magnetický moment nenulový. V materiálu se vyskytují magnetické domény, ve kterých jsou magnetické momenty všech atomů uspořádány paralelně do jednoho směru. V přítomnosti magnetického pole se magnetické momenty atomů všech domén začnou stáčet ve směru působícího a dochází k výraznému zesílení magnetického pole. Po zániku vnějšího magnetického pole se některé momenty domén nevracejí do původního stavu a látka stále vykazuje magnetismus, materiál vykazuje tzv. magnetickou hysterezi. Při dosažení Curieovy teploty dochází k přeměně feromagnetika na paramagnetikum.

Antiferomagnetismus ($\mu_r \approx 1$)

Jsou to paramagnetické materiály s krystalickou strukturou. Vzájemným působením atomů vznikají magnetické domény, ve kterých jsou magnetické momenty atomů orientovány antiparalelně a navenek nejeví magnetický moment. Od určité teploty antiparalelní orientace magnetických momentů atomů zaniká a látky se chovají jako paramagnetikum.

Ferimagnetismus ($\chi_m \gg 0, \mu_r \gg 1$)

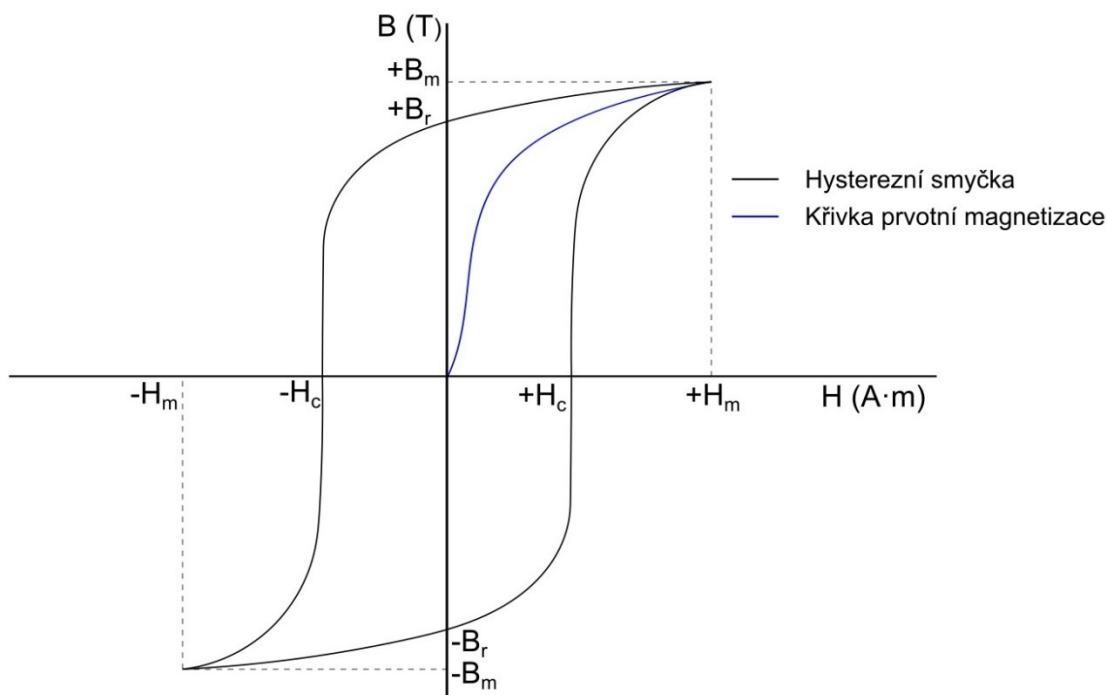
Specifický případ antiferomagnetismu. Magnetické momenty atomů jsou orientovány antiparalelně, ale nejsou stejně velké. Nedochozí tak k úplné kompenzaci a vzniká rozdílové magnetické pole.

Hysterezní smyčka

Vložením nezmagnetované feromagnetického materiálu do magnetického pole se začne materiál magnetizovat podle křivky prvotní magnetizace (viz obr. 7). V nezmagnetovaném stavu je orientace magnetických domén nepravidelná. Při působení magnetického pole se rozšiřují magnetické domény, které mají směr nejbližší směru působícího magnetického pole, a děje se tak na úkor oblastí, které jsou orientovány nepříznivě. Tyto změny v materiálu jsou vratné a při poklesu působícího magnetického pole se vektor magnetické polarizace vrátí do původního stavu. Dalším zvyšováním

hodnoty působícího magnetického pole již dochází k nevratným přeskokům směru opačně orientovaných magnetických domén do směru působícího magnetického pole. Pokračováním zvyšování intenzity magnetického pole se orientace směru domén zpřesňuje, až jejich směr splyne s působícím magnetickým polem. Materiál dosáhl stavu nasycení.

Vlivem nevratných změn během magnetizace již při snížení intenzity magnetického pole magnetizace neprobíhá po křivce prvotní magnetizace, ale po hysterezní smyčce. Při zrušení působícího magnetického pole ($H = 0$), materiál stále vykazuje tzv. remanentní magnetickou indukci $+B_r$. Působením magnetického pole opačného směru se magnetická indukce snižuje až dosáhne nulové hodnoty. Hodnota intenzity magnetického pole, kdy je tohoto stavu dosaženo, se nazývá koercitivní intenzita magnetického pole $-H_c$ a popisuje, jaká hodnota intenzity magnetického pole opačného směru je třeba pro zrušení remanence. Zvyšováním opačně orientované intenzity magnetického pole se zvyšuje magnetická indukce orientovaná ve směru působícího magnetického pole, až dosáhne stavu nasycení a maximální hodnoty magnetické indukce $-B_m$. Další postup je analogický s výše uvedenými poznatky. Snižováním intenzity magnetického pole až na nulovou křivka postupně přechází do hodnoty remanentní intenzity magnetického pole $-B_r$. Působením magnetického pole původního směru se nyní magnetická indukce zvyšuje, přechází přes hodnotu koercitivní intenzity magnetického pole $+H_c$, až dosáhne opět nasycení a hodnoty maximální magnetické indukce $+B_m$, nyní v původním směru. Hysterezní smyčka je uzavřena.



Obr. 7 Znáznornění hysterezní smyčky

Podle šířky hysterezní smyčky se magnetické materiály rozlišují na materiály magneticky tvrdé (široká smyčka) a magneticky měkké (úzká smyčka).

Magneticky tvrdé materiály:

- $H_c > 800 \text{ A.m}$
- požaduje se vysoká hodnota remanentní magnetické indukce
- používají se k vytváření stejnosměrných magnetických polí a k výrobě permanentních magnetů

Magneticky měkké materiály:

- $H_c < 800 \text{ A.m}$
- vysoká počáteční a maximální permeabilita
- vysoká maximální magnetická indukce
- malé hysterezní ztráty a ztráty vířivými proudy
- použití v elektrických strojích a zařízeních s proměnným magnetickým polem

4.1.3 Magnetická měření

Vlastnosti feromagnetických materiálů se mohou měřit při stejnosměrném nebo střídavém magnetování. Při stejnosměrném magnetování (pomalé změny magnetického pole) se změří statická hysterezní smyčka. Při střídavém magnetování (magnetické pole se mění periodicky, $f > 10 \text{ Hz}$) se změří dynamická hysterezní smyčka. Plocha hysterezní smyčky je úměrná hysterezním ztrátám. Při střídavém magnetování se již projevuje vliv vířivých proudů a dynamická hysterezní smyčka je širší než statická.

Měření dynamické hysterezní smyčky

K zobrazení dynamické hysterezní smyčky lze využít dvoukanálový osciloskop v režimu X-Y.

První kanál sleduje proud v primárním vinutí vzorku a reprezentuje hodnotu intenzity magnetického pole. Pro snímání proudu se používá rezistor a kanál tak měří úbytek napětí na tomto rezistoru. Protékající proud pak lze snadno vypočítat při známé hodnotě odporu a změřené hodnotě napětí pomocí Ohmova zákona, nebo změřit ampérmetrem. Napětí na tomto kanálu reprezentuje intenzitu magnetického pole. Za předpokladu, že je magnetický obvod uzavřený a homogenní, pak lze na základě výrazu 4.34 psát

$$H = \frac{N_1 i_1}{l_s} \quad (4.37)$$

kde N_1 je počet závitů primárního vinutí, I_1 proud tekoucí primárním vinutím a l_s je délka střední siločáry. Hodnotu intenzity magnetického pole lze tak spočítat z naměřeného napětí na osciloskopu u_1 a z hodnoty odporu snímacího rezistoru R_1 výrazem

$$H = \frac{N_1 \frac{u_1}{R_1}}{l_s} \quad (4.38)$$

Druhý kanál snímá napětí na sekundárním vinutí vzorku a reprezentuje hodnotu magnetické indukce. Jelikož je indukované napětí úměrné derivaci magnetického toku podle času (viz výraz 4.1), je nutné

pro zobrazení na osciloskopu toto napětí integrovat. Integrovaní provádí integrační člen, tvořený rezistorem a kondenzátorem. Časová konstanta integračního členu musí být větší než perioda měřeného signálu, jinak dochází ke zkreslení zobrazení dynamické hysterezní smyčky. Hodnotu napětí na integrátoru vyjadřuje výraz

$$u_2 = \frac{1}{C} \int i_2 \cdot dt = \frac{1}{R_2 C} \int \mathcal{E}_2 \cdot dt \quad (4.39)$$

Pomocí výrazů 4.2, 4.18 a 4.39 potom lze psát

$$u_2 = \frac{1}{R_2 C} \int -N_2 \cdot \frac{d\Phi}{dt} \cdot dt = \frac{1}{R_2 C} \cdot (-N_2)BS \quad (4.40)$$

Nyní je možné z naměřeného napětí vypočítat hodnotu magnetické indukce

$$B = \frac{R_2 C u_2}{N_2 S} \quad (4.41)$$

kde R_2 a C jsou hodnoty odporu a kapacity integračního členu, u_2 je napětí změřené na osciloskopu, N_2 počet závitů sekundárního vinutí a S je průřez jádra.

Měření amplitudové magnetizační charakteristiky a určení amplitudové permeability

Amplitudová permeabilita je definována výrazem [6]

$$\mu_a = \frac{B_m}{\mu_0 H_m} \quad (4.42)$$

kde B_m a H_m jsou amplitudy magnetické indukce a intenzity magnetického pole. Měří se tzv. amplitudová magnetizační charakteristika. Je to křivka, na které leží maximální hodnoty magnetické indukce pro různé hodnoty intenzity magnetického pole. Při měření s osciloskopem se využije stejné zapojení s integračním členem, jak při měření hysterezních smyček.

Měření se provádí při napěťovém magnetování, tj. požadavkem je sinusový průběh magnetické indukce B . Intenzita magnetického pole pak bude neharmonická. Napěťového magnetování se dosáhne buzením vzorku ze zdroje sinusového napětí, kdy vstupní obvod musí mít nízký odpor (nízký výstupní odpor zdroje, nízký odpor primárního vinutí vzorku, nízký odpor měřících přístrojů).

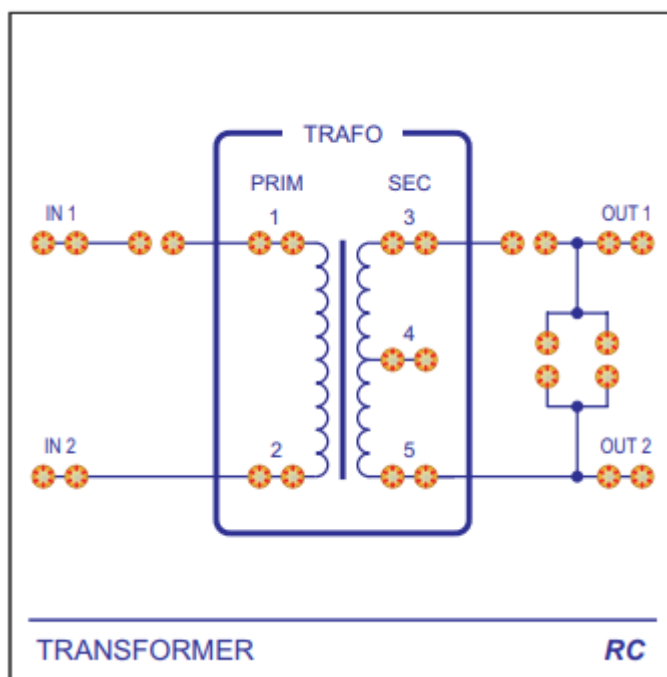
Pro výpočet amplitudy intenzity magnetického pole se použije výraz 4.38 a dosazuje se hodnota amplitudy průběhu magnetizačního proudu zobrazeném na osciloskopu.

Pro výpočet amplitudy magnetické indukce se opět využije integrátoru. Na osciloskopu je tak zobrazen průběh magnetické indukce. Přepočet změřeného napětí na skutečnou hodnotu magnetické indukce je dán výrazem 4.41, do kterého se dosadí amplituda průběhu magnetické indukce zobrazené na osciloskopu.

4.2 Moduly pro provoz transformátoru

Transformátor

Transformátor má převod 1 : 1. V polovině sekundárního vinutí se nachází odbočka. Modul obsahuje ochranu proti proudovému a napěťovému přetížení.



Obr. 8 Zobrazení modulu transformátoru

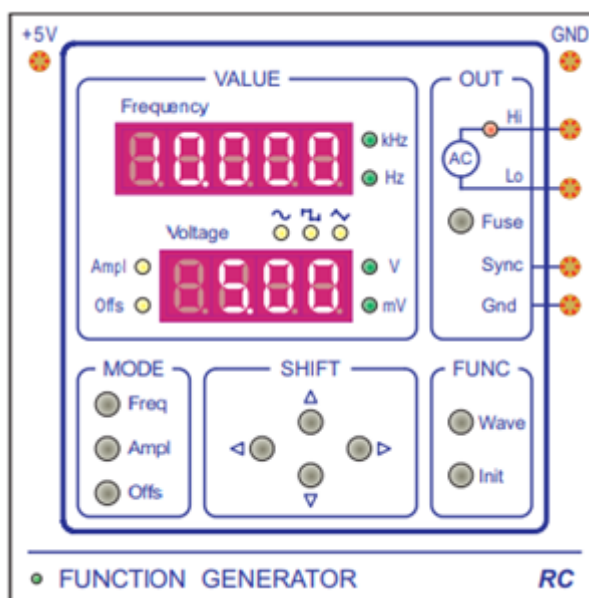
Tab. 1 Parametry modulu transformátoru

	Parametr	Hodnota	Přesnost (t = 25 °C)
Primární vinutí	Počet závitů	170	-
	$R_{I2} (\Omega)$	5	$\pm 20 \%$
	$U_{MAX} (V)$	10	-
	$I_{MAX} (A)$	0,25	-
Sekundární vinutí	Počet závitů	85 (3–4)	-
		85 (4–5)	-
	$R_{34} (\Omega)$	2,5	$\pm 20 \%$
	$R_{45} (\Omega)$	2,5	$\pm 20 \%$
	$U_{MAX} (V)$	10	-
	$I_{MAX} (A)$	0,25	-
Jádro	Materiál jádra	EI plechy M111-35N	
	Permeabilita ($mH.m^{-1}$)	5	-
	Průřez (mm^2)	100	-
	Délka střední siločáry (mm)	65	-

Generátor funkcí

Modul umožňuje generovat sinusové, obdélníkové a trojúhelníkové napětí. Výstup je chráněn elektronickou pojistkou proti přetížení, která zaúčinkuje při překročení maximálního výstupního proudu 25 mA. Indikací přetížení je červená LED dioda. Stisknutím tlačítka FUSE dojde k resetování ochrany. Modul generátoru má plovoucí AC výstup a také synchronizační výstup (SYNC) určený k načasování startu měření. Modul je napájen napětím +5 V.

Tvar signálu se volí tlačítkem WAVE. Tlačítka FREQ, AMPL a OFFS lze navolit frekvenci, amplitudu a offset (DC složka) zvoleného signálu. Tlačítko INIT provede inicializaci modulu a nastaví sinusový signál o frekvenci 100 Hz, amplitudě 5 V a nulovém offsetu. Podle zvoleného parametru v sekci MODE se tlačítka v sekci SHIFT volí horizontálními tlačítky volí digit na LED displeji a vertikálními tlačítky hodnota zvoleného digitu. Aktuálně zvolený parametr a tvar signálu je indikován žlutými LED diodami, zobrazované jednotky frekvence a napětí pak zelenými LED diodami.



Obr. 9 Zobrazení modulu generátoru funkcí

Tab. 2 Parametry modulu generátoru funkcí

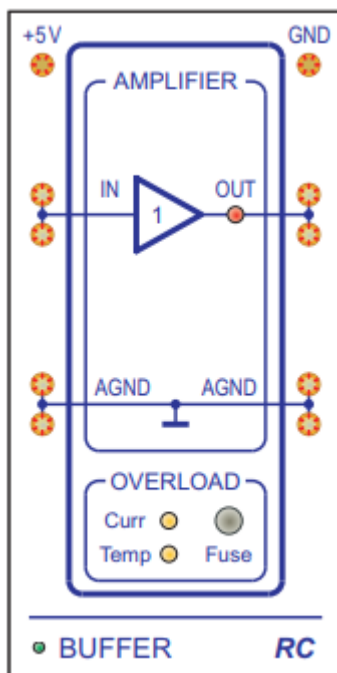
Parametr	Hodnota		Přesnost
	min	max	
Frekvence (Hz)	0,01	10 000	$\pm 0,001 \%$
Amplituda (V)	0,05	10	$\pm 1 \%$
Offset (V)	-8	8	$\pm (1 \% A + 1 \% O + 2 \text{ mV})$
Tvar signálu			-
I_{OUT} (mA)	-	25	-
R_{OUT} (Ω)	<0,1		-

Teplotní rozsah přesnosti: 15–35 °C. Doba zahřátí 15 minut.

A-nastavená amplituda, O-nastavený offset.

Výkonový zesilovač

Výkonový zesilovač má zesílení $A = 1$. Jelikož generátor funkcí umožňuje odebírat maximální proud 25 mA lze zařazením tohoto modulu zvýšit odebíraný proud až na 220 mA. Je tedy výhodné použít tento modul při měření s transformátorem a při měření V/A charakteristik součástek. Modul obsahuje elektronickou pojistku proti teplotnímu a proudovému přetížení. V případě přetížení dojde k odpojení výstupu a rozsvícení příslušné LED diody (CURR, TEMP). Tlačítkem FUSE dojde k resetování ochrany.



Obr. 10 Zobrazení modulu výkonového zesilovače

Tab. 3 Parametry modulu výkonového zesilovače

Parametr	Hodnota		Přesnost
	min	max	
Zesílení (-)	1		$\pm 0,5 \%$
Offset (V)	0		$\pm 10 \text{ mV}$
Frekvenční rozsah (Hz)	0	10 000	-
Výstupní napětí (V)	-12	12	-
$R_{IN} (\Omega)$	100 000		$\pm 1 \%$
$R_{OUT} (\Omega)$	<0,1		-
$I_{OUT} (\text{mA})$	-220	220	-

Diskrétní součástky

Diskrétní součástky jsou realizovány jako modul, který tvoří samotná součástka, zlacené vývody s roztečí 5 mm a materiál, který součástku nese a je v něm propojení součástky s vývody. Součástky mají vysokou přesnost a vysokou stabilitu parametrů. Diskrétní součástky lze zapojit mezi volné vývody u jednotlivých modulů. Pro potřeby laboratorní úlohy Transformátor jsou využity rezistory 10 Ω a 1 M Ω a svitkový kondenzátor 100 nF.

Měřicí systém

Měřicí systém tvoří měřicí jednotka (ADDU) a software rc-2000. Měřicí jednotka komunikuje s PC sériovým rozhraním. Měřicí systém disponuje měřicími módy:

- Dvoukanálový osciloskop
- Jednakanálový osciloskop a generátor
- Měření voltampérových charakteristik
- Měření amplitudových a fázových frekvenčních charakteristik
- Osmikanálový logický analyzátor
- Osmikanálový logický generátor a osmikanálový logický analyzátor
- Dvoukanálový čítač

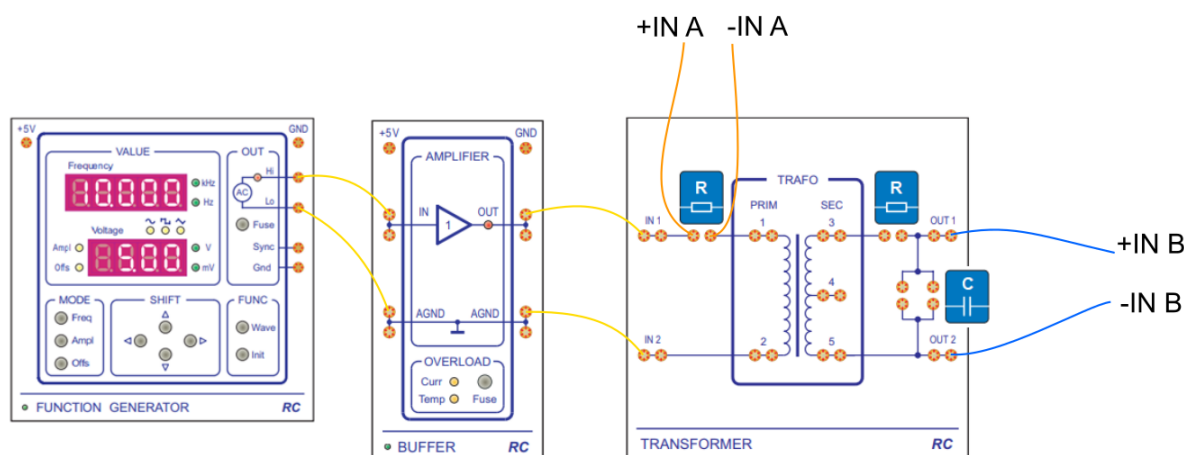
Pro měření laboratorní úlohy Transformátor je využit měřicí mód dvoukanálový osciloskop. V tomto režimu se zobrazí okno s ovládacími prvky a plochou pro vykreslení signálů. Měřit lze ve dvou režimech. V režimu NORMAL lze tlačítkem RUN spustit cyklické měření, nebo tlačítkem SINGLE odměřit jeden vzorek. V režimu SEQUENCE lze odměřit čtyři jednotlivé měřicí cykly na jedné obrazovce. K dispozici jsou celkem čtyři zobrazovací módy. Mód YT pro zobrazení dvoukanálového časového průběhu, mód XY se zobrazením časového průběhu, mód PHASOR pro zobrazení fázorového diagramu a časového průběhu, a mód HARMONIC pro harmonickou analýzu (amplituda a fáze) a zobrazení časového průběhu. Pro vyhodnocení signálu lze využít funkce CURSOR nebo MEASURE. Funkce CURSOR umožňuje posouváním kurzorů po časové ose měřit velikost signálů. Funkce MEASURE zobrazí efektivní, střední, maximální a minimální hodnoty signálů a frekvenci signálů. Časovou základnu lze měnit tlačítky v části TIME. Rozsahy os y pro kanál A a B se nastavuje v části GAIN. Průběhy je možné vytisknout nebo uložit jako obrázek funkcí PRINT. Naměřená data lze vyexportovat do textového souboru funkcí SAVE.

4.3 Vzor zadání laboratorní úlohy Transformátor

Zadání:

1. Zobrazte dynamické hysterezní smyčky pro hodnoty napětí 1, 2,5, 4, 5, 6 a 7 V a průběh magnetické indukce a magnetizačního proudu. Při každé hodnotě zadaného napětí změřte a vypočítejte maximální hodnoty magnetické indukce ($+B_m$, $-B_m$), maximální hodnoty intenzity magnetického pole ($+H_m$, $-H_m$), hodnoty remanentní magnetické indukce ($+B_r$, $-B_r$) a hodnoty koercitivní intenzity magnetického pole ($+H_c$, $-H_c$).
2. Změřte magnetizační amplitudovou charakteristiku, vypočítejte hodnoty amplitudové permeability a zobrazte funkční závislost $B_m = f(H_m)$ a $\mu_a = f(H_m)$

Schéma zapojení:



Obr. 11 Schéma zapojení laboratorní úlohy Transformátor

Postup měření:

Sestavte obvod podle schématu zapojení. Před připojením funkčního generátoru k obvodu na něm nastavte parametry: napětí 8 V, frekvence 50 Hz, offset 0 V a sinusový tvar napětí. Hodnotu snímacího rezistoru R_1 v primárním obvodu transformátoru zvolte 10 Ω . Na kanálu A tak bude zobrazen průběh úbytku napětí na snímacím rezistoru, který reprezentuje magnetizační proud. Dle Ohmova zákona pak vypočítáte velikost magnetizačního proudu a z jeho hodnoty se vypočítá intenzita magnetického pole. Parametry RC integračního členu v sekundárním obvodu transformátoru volte: $R_2 = 1 \text{ M}\Omega$ a $C_2 = 100 \text{ nF}$. Na kanálu B tak bude zobrazen průběh magnetické indukce. Z hodnoty změřeného napětí na tomto kanálu vypočítáte hodnotu magnetické indukce. Hysterezní smyčky zobrazíte v módu dvoukanálového osciloskopu v režimu XY. Pomocí kurzorů se pak pohybujete po hysterezní smyčce a v příslušných zadaných bodech odečtete hodnoty napětí a vypočítáte příslušné skutečné hodnoty magnetické indukce a intenzity magnetického pole. Funkcí PRINT uložíte snímek s hysterezní smyčkou a průběhy napětí na obou kanálech.

Pro měření magnetizační amplitudové charakteristiky ponechte stejné obvodové zapojení jako v předchozím měření. Při tomto měření zvolte funkci MEASURE, ve které jsou zobrazeny maximální, minimální a efektivní hodnoty napětí na obou kanálech. Nastavte takovou hodnotu napětí, aby primárním obvodem protékal magnetizační proud, jehož amplituda je 210 mA (při $R_1 = 10 \, \Omega$ je hodnota

proudu 10x menší než změřené napětí na kanálu A). Snižujte proud postupně až na hodnotu 1 mA a pro každou nastavenou hodnotu odečítejte maximální hodnoty napětí na obou kanálech. Od hodnoty proudu 210 mA až do hodnoty 20 mA měřte po kroku 10 mA, od 20 mA do 1 mA měřte po vhodně zvolených malých krocích. Ze změřených hodnot vypočítejte maximální hodnoty intenzity magnetického pole H_m a B_m . Z těchto hodnot pak vypočítejte amplitudovou permeabilitu μ_a a zobrazte zadané funkční závislosti.

4.4 Vypracování laboratorní úlohy Transformátor

Měření hysterezních křivek

Tab. 4 Naměřené hodnoty při měření hysterezních smyček

Naměřené hodnoty	$U = 7 \text{ V}$	$U = 6 \text{ V}$	$U = 5 \text{ V}$	$U = 4 \text{ V}$	$U = 2,5 \text{ V}$	$U = 1 \text{ V}$
$+H_c \text{ (mV)}$	100	100	85	70	52	24
$-H_c \text{ (mV)}$	-100	-100	-85	-75	-54	-27
$+B_r \text{ (mV)}$	104	96	80	69	42	17
$-B_r \text{ (mV)}$	-100	-98	-84	-68	-40	-14
$+B_m \text{ (mV)}$	208	186	154	124	78	30
$-B_m \text{ (mV)}$	-210	-188	-156	-124	-81	-33
$+H_m \text{ (mV)}$	1800	820	290	175	98	50
$-H_m \text{ (mV)}$	-1820	-840	-305	-185	-104	-50

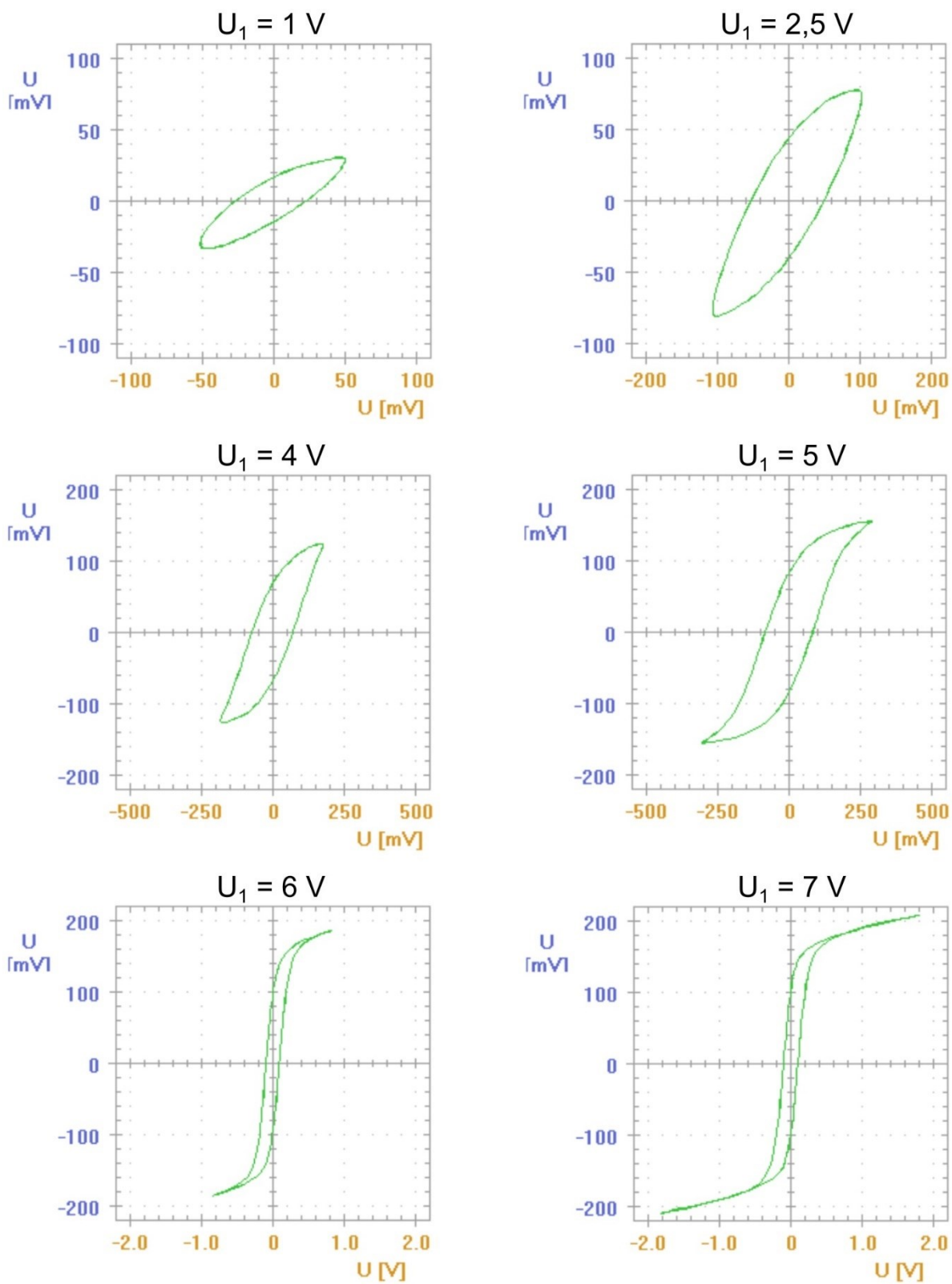
Tab. 5 Skutečné přepočítané hodnoty intenzit magnetického pole a magnetických indukci

Skutečné hodnoty	$U = 7 \text{ V}$	$U = 6 \text{ V}$	$U = 5 \text{ V}$	$U = 4 \text{ V}$	$U = 2,5 \text{ V}$	$U = 1 \text{ V}$
$+H_c \text{ (A.m}^{-1}\text{)}$	26,42	26,15	22,23	18,31	13,60	6,28
$-H_c \text{ (A.m}^{-1}\text{)}$	-26,42	-26,15	-22,23	-19,62	-14,12	-7,06
$+B_r \text{ (T)}$	0,61	0,56	0,47	0,41	0,25	0,10
$-B_r \text{ (T)}$	-0,59	-0,58	-0,49	-0,40	-0,24	-0,08
$+B_m \text{ (T)}$	1,22	1,09	0,91	0,73	0,46	0,18
$-B_m \text{ (T)}$	-1,24	-1,11	-0,92	-0,73	-0,48	-0,19
$+H_m \text{ (A.m}^{-1}\text{)}$	470,77	214,46	75,85	45,77	25,63	13,08
$-H_m \text{ (A.m}^{-1}\text{)}$	-476,00	-219,69	-79,77	-48,38	-27,20	-13,08

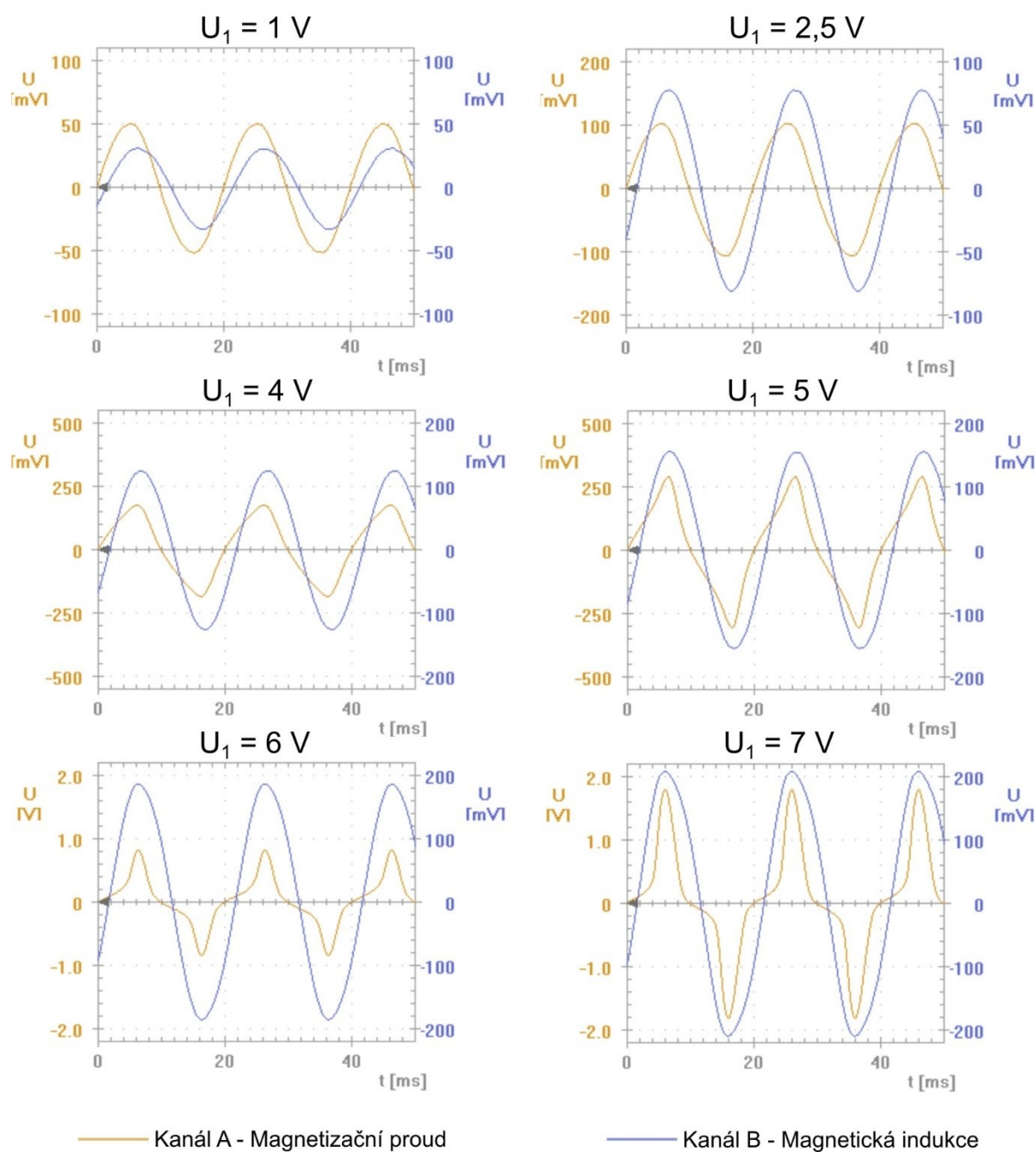
Příklad výpočtu:

$$H = \frac{N_1 \frac{u_i}{R_1}}{l_s} = \frac{170 \cdot \frac{0,1}{10}}{0,065} = 26,15 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$$

$$B = \frac{R_2 C u_2}{N_2 S} = \frac{10^6 \cdot 100 \cdot 10^{-9} \cdot 0,104}{170 \cdot 0,0001} = 0,61 \text{ T}$$



Obr. 12 Zobrazení dynamických hysterezních magnetického obvodu měřeného transformátoru při napájecím napětí 1, 2,5, 4, 5, 6 a 7 V



Obr. 13 Zobrazení průběhů magnetizačního proudu a magnetické indukce měřeného transformátoru při napájecím napětí 1, 2,5, 4, 5, 6 a 7 V

Měření magnetizační amplitudové charakteristiky

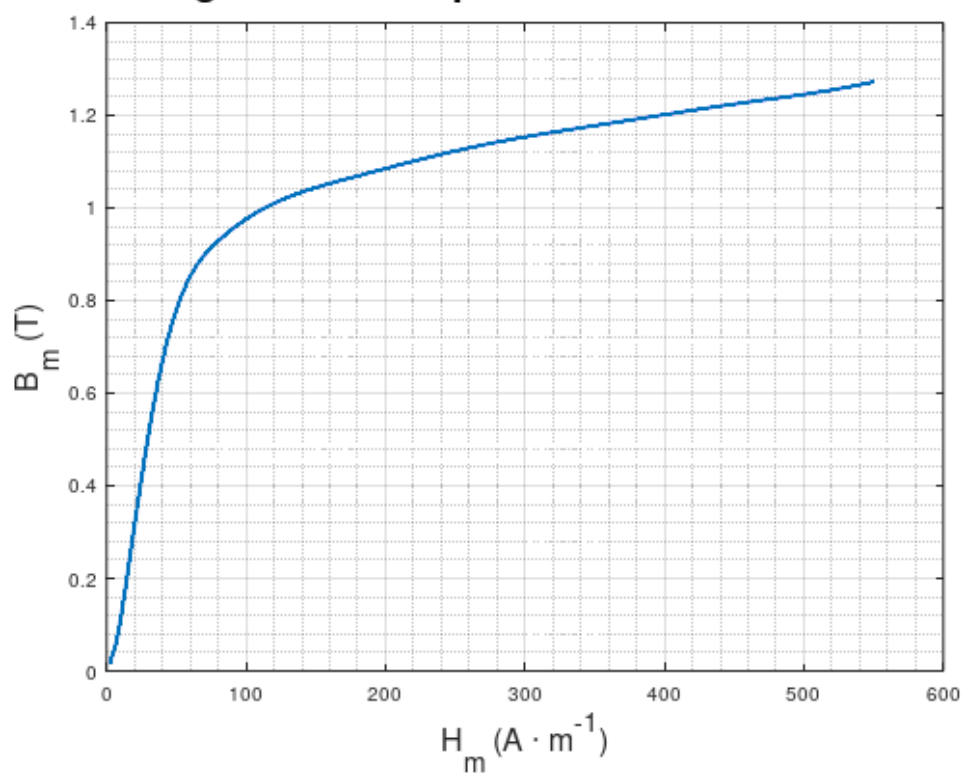
Tab. 6 Naměřené a vypočítané hodnoty při měření magnetizační amplitudové charakteristiky

U_{1m} (mV)	I_{1m} (mA)	U_{2m} (mV)	H_m (A.m ⁻¹)	B_m (T)	μ_a (-)
2100	210	216	549,23	1,271	1841,54
2000	200	214	523,08	1,259	1915,35
1900	190	212	496,92	1,247	1996,96
1800	180	208	470,77	1,224	2069,01
1700	170	208	444,62	1,224	2190,70
1600	160	206	418,46	1,212	2304,83
1500	150	204	392,31	1,200	2434,12
1400	140	202	366,15	1,188	2581,95
1300	130	200	340,00	1,176	2752,44
1200	120	196	313,85	1,153	2923,46
1100	110	194	287,69	1,141	3156,10
1000	100	192	261,54	1,129	3435,15
900	90	190	235,38	1,118	3779,74
800	80	188	209,23	1,106	4206,50
700	70	182	183,08	1,071	4655,20
600	60	176	156,92	1,035	5248,71
500	50	174	130,77	1,024	6231,35
400	40	168	104,62	0,988	7515,06
300	30	158	78,46	0,929	9422,31
200	20	136	52,31	0,800	12170,14
180	18	128	47,08	0,753	12727,66
160	16	118	41,85	0,694	13196,36
140	14	105	36,62	0,618	13429,51
120	12	90	31,38	0,529	13415,07
100	10	74	26,15	0,435	13237,55
80	8	58	20,92	0,341	12971,28
70	7	49	18,31	0,288	12516,83
60	6	38	15,69	0,224	11360,96
50	5	28	13,08	0,165	10038,44
40	4	20	10,46	0,118	8977,19
30	3	13	7,85	0,076	7704,32
20	2	8	5,23	0,047	7151,32
18	1,8	7	4,71	0,041	6927,13
16	1,6	6	4,18	0,035	6663,19
14	1,4	5	3,66	0,029	6305,32
12	1,2	4	3,14	0,024	6082,35
10	1	3	2,62	0,018	5467,15

Příklad výpočtu:

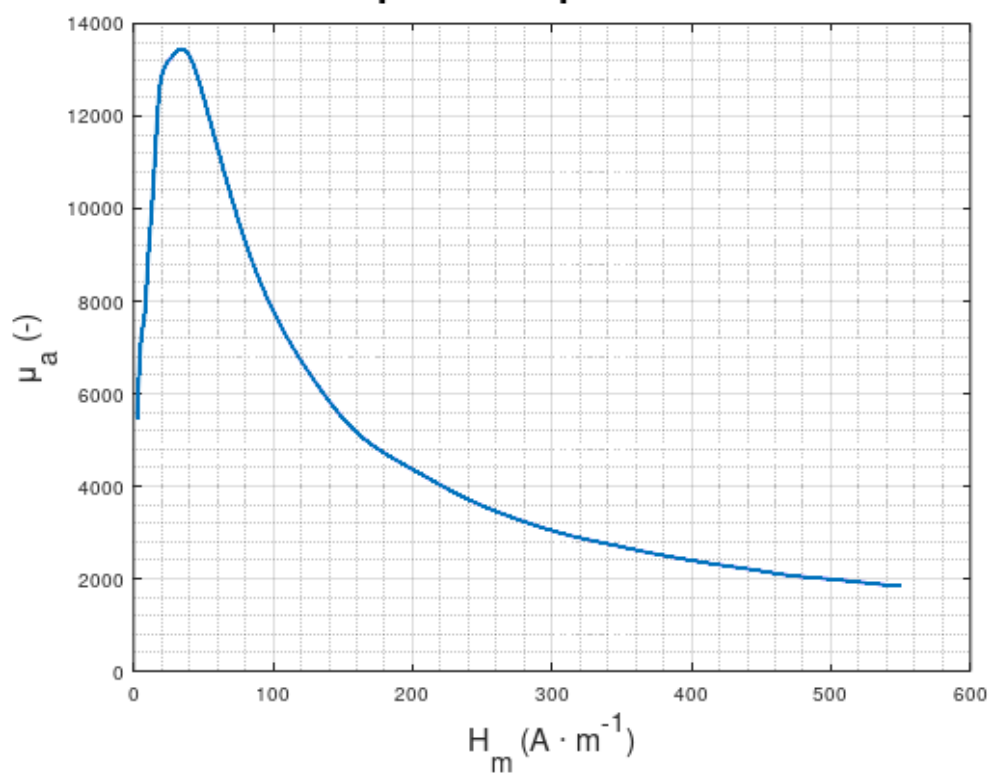
$$\mu_a = \frac{B_m}{\mu_0 H_m} = \frac{1,271}{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 549,23} = 1841,54$$

Magnetizační amplitudová charakteristika



Obr. 14 Změřená magnetizační amplitudová charakteristika

Amplitudová permeabilita



Obr. 15 Průběh amplitudové permeability magnetického obvodu transformátoru

Závěr:

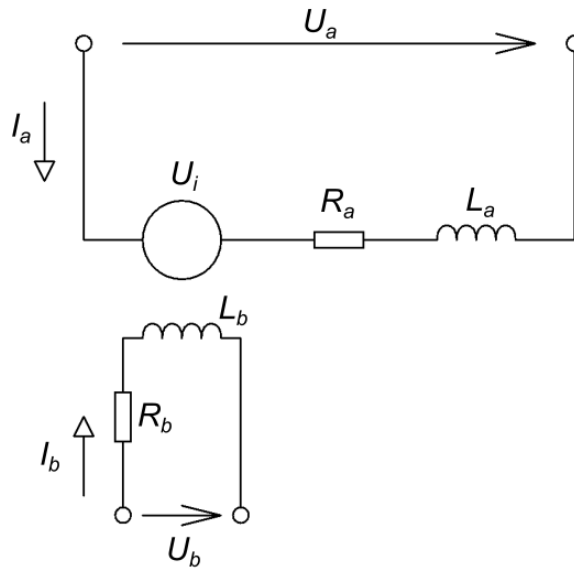
V prvním bodě zadání jsem změřil a vypočítal hodnoty maximálních a koercitivních intenzit magnetického pole, a maximálních a remanentních magnetických indukcí pro jednotlivá napětí (viz tab. 4 a 5). Změřené dynamické hysterezní smyčky jsou zobrazeny na obrázku 12. Od hodnoty napětí 5 V je již patrný stav magnetického nasycení látky, kdy se od tohoto bodu již maximální hodnota indukce zvyšuje pouze vlivem pole samotné cívky. Vliv magnetického sycení látky je zřejmý i z naměřených hodnot, kdy se při přechodu z 6 V na 7 V maximální intenzita magnetického pole zdvojnásobí, avšak maximální magnetická indukce již vzroste pouze o 0,13 T. Při změně hodnoty napětí z 6 V na 7 V se již i koercitivní intenzita zvýší nepatrně z 26,15 A.m⁻¹ na 26,42 A.m⁻¹. Z průběhů magnetizačního proudu (obr. 13) je patrný jeho neharmonický průběh od hodnoty napětí 4 V, který je způsoben nelinearitou vlivem magnetického nasycení látky.

V druhém bodě jsem měřil magnetizační amplitudovou charakteristiku a vypočítal hodnoty amplitudové permeability μ_a . Naměřené a vypočtené hodnoty jsou zobrazeny v tabulce 6. Počáteční amplitudová permeabilita má hodnotu 5467,15 při $H_m = 2,62$ A.m⁻¹ a $B_m = 0,018$ T. Maximální hodnota amplitudové permeability byla zjištěna interpolací naměřených a vypočítaných hodnot a má hodnotu 13451 v rozsahu $H_m = 33,91$ až $34,83$ A.m⁻¹ a $B_m = 0,62$ až $0,63$ T. Průběhy amplitudové permeability a magnetizační amplitudové charakteristiky jsou zobrazeny na obrázcích 14 a 15.

5 Laboratorní úloha Motorgenerátor

5.1 Teoretický rozbor

Stejnoseměrné motory s cizím buzením se používají v regulačních pohonech v celé řadě aplikací. Nezávislost budicího vinutí a vinutí kotvy motoru umožňuje zjednodušit regulační struktury a usnadnit říditelnost pohonu. V regulační technice se stejnosměrných motorů malých výkonů používá například jako tachodynamu. V oblasti malých až středních výkonů se používají motory s permanentními magnety. Výhodou stejnosměrných motorů je velká výkonová a momentová přetížitelnost. Stejnoseměrný motor se skládá z budicího obvodu, obvodu kotvy a mechanické části. Schéma stejnosměrného motoru s cizím buzením je znázorněno na obr.



Obr. 16 Schéma stejnosměrného motoru s cizím buzením

Popis stejnosměrného motoru s cizím buzením soustavou diferenciálních rovnic [7]

$$u_a = u_i + R_a i_a + L_a \cdot \frac{di_a}{dt} \quad (5.1)$$

$$u_b = R_b i_b + L_b \cdot \frac{di_b}{dt} \quad (5.2)$$

$$m_m - m_{PM} = J_C \cdot \frac{d\omega}{dt} \quad (5.3)$$

V ustáleném stavu přechází soustava diferenciálních rovnic na lineární soustavu

$$U_a = U_i + R_a I_a = c\Phi \cdot \omega + R_a I_a \quad (5.4)$$

$$U_b = R_b I_b \quad (5.5)$$

$$M_m = M_{PM} \cdot \quad (5.6)$$

Vztah mezi otáčkami a úhlovou frekvencí je dán výrazem

$$\omega = \frac{2\pi \cdot n}{60} . \quad (5.7)$$

Pro elektromagnetický moment motoru platí

$$M = c\Phi \cdot I_a . \quad (5.8)$$

Podle rovnic 5.4 a 5.8 lze pak psát pro otáčky motoru

$$\omega = \frac{U_a}{c\Phi} - \frac{R_a I_a}{c\Phi} = \frac{U_a}{c\Phi} - \frac{R_a \cdot M}{(c\Phi)^2} = \omega_0 - \Delta\omega . \quad (5.9)$$

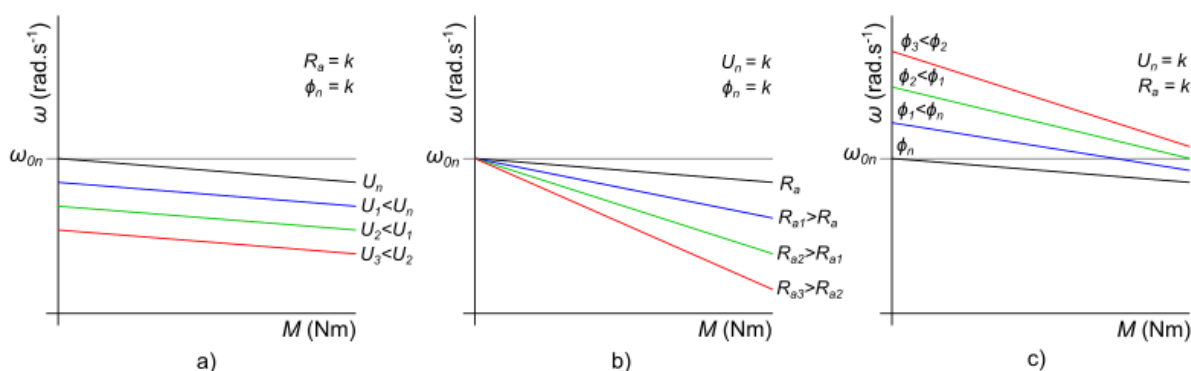
Člen $\frac{U_a}{c\Phi}$ reprezentuje otáčky naprázdno při daném napájecím napětí. Člen $-\frac{R_a I_a}{c\Phi}$ reprezentuje pokles otáček s rostoucím zatížením motoru.

Z rovnice 5.9 vyplývá, že otáčky stejnosměrných motorů s cizím buzením lze řídit změnou napájecího napětí U_a , změnou odporu kotvy R_a a změnou magnetického toku ϕ .

Změnou napájecího napětí U_a se mění velikost otáček naprázdno. Sklon charakteristik se nemění, jsou rovnoběžné.

Zvýšením odporu kotvy zařazením přídatného rezistoru se mění sklon mechanické charakteristiky, stává se měkčí. Odpor kotvy způsobuje úbytek rychlosti v závislosti na zatížení. Jedná se o nevhodný způsob řízení otáček, kdy se v přídatném rezistoru přeměňuje elektrická energie na teplo.

Snížením magnetického toku se zvyšuje velikost otáček naprázdno a zároveň se zvyšuje sklon mechanické charakteristiky. Změny magnetického toku se dosáhne změnou buzení (změna napětí U_b). Toho lze dosáhnout u DC motorů s cizím buzením. U DC motorů s permanentními magnety je buzení konstantní a otáčky lze řídit pouze změnou napájecího napětí nebo změnou odporu kotvy.

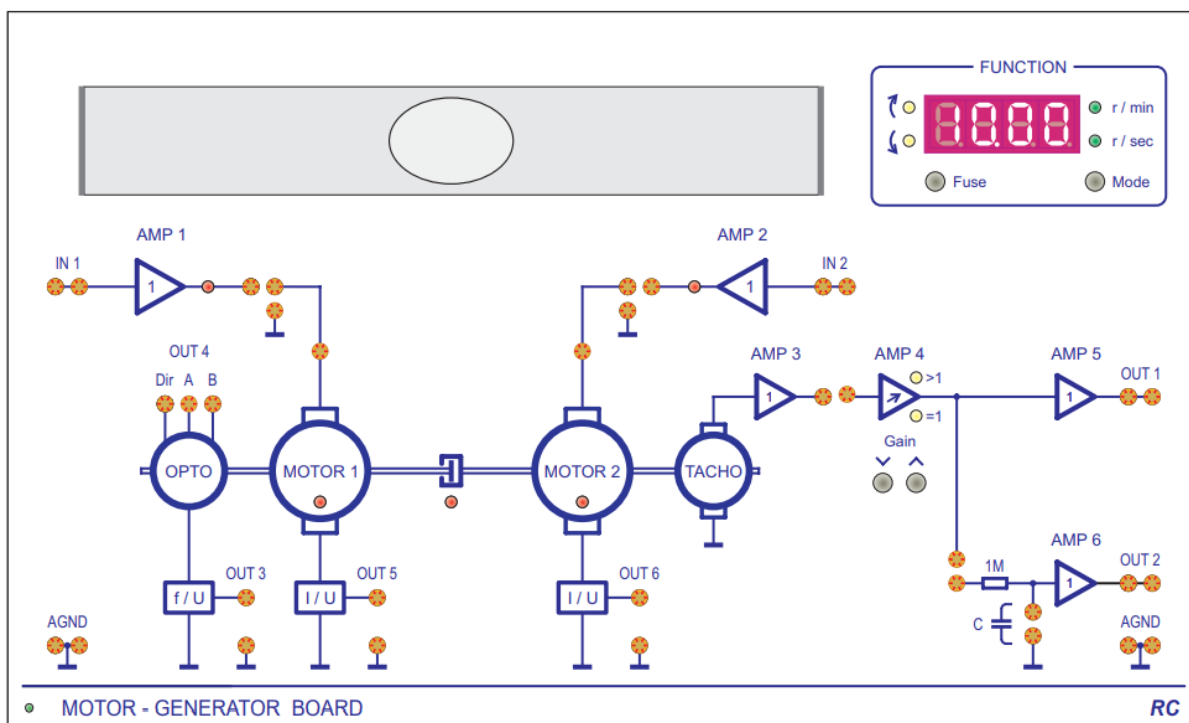


Obr. 17 Mechanické charakteristiky DC motoru s cizím buzením: a) změna napájecího napětí U_a , b) změna odporu kotvy R_a , c) změna magnetického toku ϕ

5.2 Moduly pro provoz motorgenerátoru

Modul motorgenerátor

Modul motorgenerátoru tvoří soustava dvou stejnosměrných motorků, které jsou souose spojeny pružnou spojkou. Motory jsou vyrobeny technologií bezželezového rotoru, což zaručuje nízké tření, velmi malé rozběhové napětí, vysokou účinnost a dobré tepelné podmínky. Buzení obou motorů je nezávislé a je realizováno zesilovači (AMP1, AMP2) s ochranou proti přetížení. MOTOR 2 lze využít jako zátěž pro MOTOR 1. Sestava tak umožňuje využití v regulační technice i k měření charakteristik malých stejnosměrných motorů. Otáčky jsou snímány tachodynamem a optickým snímačem s převodníkem f/U . V bloku FUNCTION je na displeji zobrazen výstup optického snímače (r/min nebo r/sec) a indikace směru otáčení. Tlačítkem MODE lze změnit způsob zobrazení otáček. Displej také slouží k zobrazení chybových stavů. Tlačítkem FUSE dojde k vymazání chyby. Oba dva motory disponují převodníkem proudu kotvy na napětí I/U .



Obr. 18 Zobrazení modulu motorgenerátoru

Tab. 7 Parametry modulu motorgenerátoru

		Hodnota		Přesnost (1)
		min	max	
Motor 1	Typ	DC bezželezový		
	Jmenovitý výkon (W)	4,05		-
	Napětí (V)	0,2 (2)	12,0	-
	Otáčky (r/min)	-	7800	-
	$I_{TRVALÝ}$ (A)	-	0,52	-
	Průměr (mm)	22,0		$\pm 0,1$
	Hmotnost (g)	46		-
Motor 2	Typ	DC bezželezový		-
	Jmenovitý výkon (W)	3,69		-
	Napětí (V)	0,2 (2)	12,0	-
	Otáčky (r/min)	-	8200	-
	$I_{TRVALÝ}$ (A)	-	0,43	-
	Průměr (mm)	22,0		$\pm 0,1$
	Hmotnost (g)	61		-
Motorová soustava	Výkon (W)	-	3,5	-
	Otáčky (r/min)	-	5000	-
	Časová konstanta (ms)	16		± 2
	Rozběhové napětí (V)	0,5		-
Snímač otáček	Konstanta (n/r)	512		-
	Digitální výstupy	A, B, DIR (vše TTL)		-
Převodník f/U	Konstanta	1 V/1000 r/min		$\pm 2 \%$
	R_{OUT} (Ω)	< 0,1		-
Tachodynamo	Konstanta	1 V/1000 r/min		$\pm 2 \%$
	R_{OUT} (Ω)	< 0,1 (3)		-
Zesilovač AMP 4	Zesílení (-)	1,00	2,12	$\pm 1 \%$
	Krok (-)	0,01		$\pm 20 \%$
	R_{OUT} (Ω)	< 0,1		-
Převodník I/U	Konstanta	5 mV/mA		$\pm 2 \%$
	R_{OUT} (Ω)	< 0,1		-

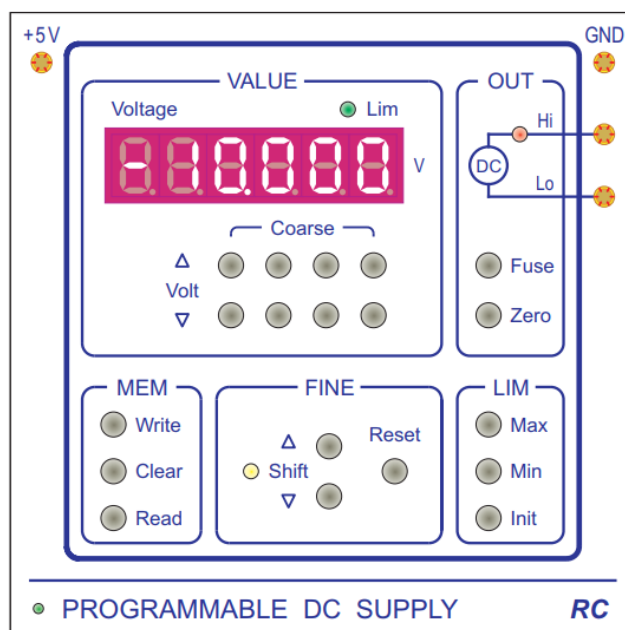
(1) Teplotní rozsah 15–35 °C. Doba zahřátí 15 minut.

(2) Rozběhové napětí motoru.

(3) Výstupní odpor zesilovače AMP 3.

Programovatelný DC zdroj

Modul je řízen procesorem a poskytuje vysoce stabilní stejnosměrné napětí. Tlačítka COARSE se nastavuje požadovaná hodnota napětí, tlačítka FINE je možné hodnotu napětí jemně donastavit. Výstup DC zdroje je plovoucí a je chráněn elektronickou pojistkou proti přetížení. Součástí modulu je paměť pro osm hodnot výstupního napětí.



Obr. 19 Zobrazení modulu programovatelného DC zdroje

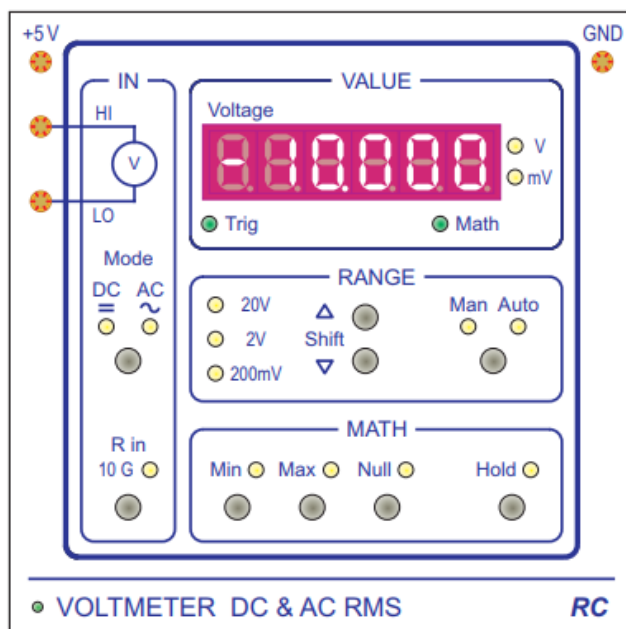
Tab. 8 Parametry modulu programovatelného DC zdroje

	Hodnota		Přesnost (1)
	min	max	
Napětí (V)	-10	10	$\pm (0,02 \% + 0,5 \text{ mV})$
Krok (mV)	1		$\pm 5 \%$
Krok jemného nastavení (μV)	80		$\pm 10 \%$
I_{OUT} (mA)	-22	22	$\pm 5 \%$
R_{OUT} (Ω)	< 0,1		-

(1) Teplotní rozsah 15–35 °C. Doba zahřátí 15 minut.

Voltmetr DC & AC RMS

Modul voltmetru slouží k měření střídavého a stejnosměrného napětí. Měřené napětí se připojuje na svorky HI a LO. Tlačítkem MODE se přepíná typ měřeného napětí DC nebo AC. Rozsah lze měnit manuálně, nebo je volen automaticky. Jsou k dispozici matematické funkce k zobrazení minimální a maximální hodnoty, nulování a k podržení hodnoty v případě měnící se zobrazované hodnoty.



Obr. 20 Zobrazení modulu DC & AC voltmetru

Tab. 9 Parametry modulu DC & AC voltmetr

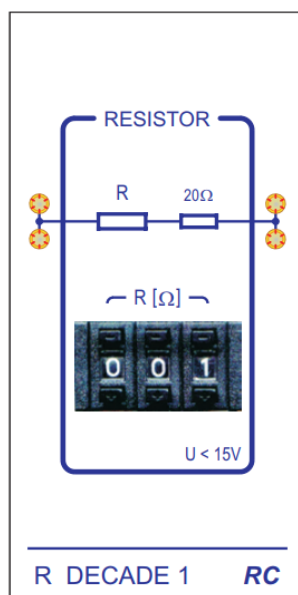
		Hodnota		Přesnost (1)
		min	max	
DC	Displej	4,5 - místný		-
	Měřicí rozsahy	200 mV		± (0,5 % + 5 digit)
		2 V		± (0,4 % + 3 digit)
		20 V		
	R _{in} (Ω)	10 M		-
	R _{in} 10G (Ω)	> 10 G (2)		-
AC	Displej	3,5 - místný		-
	Měřicí rozsahy	200 mV		± (1,0 % + 5 digit)
		2 V		± (0,8 % + 5 digit)
		20 V		
	Z _{in}	10 MΩ / 50 pF		-
	Frekvenční rozsah (Hz)	10	10k	-

(1) Teplotní rozsah 15–35 °C. Doba zahřátí 15 minut.

(2) Funkce je dostupná pro DC rozsahy 200 mV a 2 V.

Odporová dekáda 1 (20–1019 Ω)

Odporová dekáda 1 slouží k přesnému nastavení hodnoty odporu v rozsahu 20–1019 Ω .



Obr. 21 Zobrazení modulu odporové dekády

Tab. 10 Parametry modulu odporové dekády 1

	Hodnota		Přesnost (1)
	min	max	
Rozsah hodnot R (Ω)	20	1019	$\pm 1,0 / 0,5 / 0,1$ % (2)
Krok (Ω)	1		-
Teplotní koeficient (ppm/ $^{\circ}\text{C}$)	25		-
U_{MAX} (V)	15		-
I_{MAX} (mA)	250		-

(1) Teplotní rozsah 15–35 $^{\circ}\text{C}$

(2) Přesnost pro hodnoty $R < 50 \Omega$ / $50 \leq R < 100 \Omega$ / $R \geq 100 \Omega$

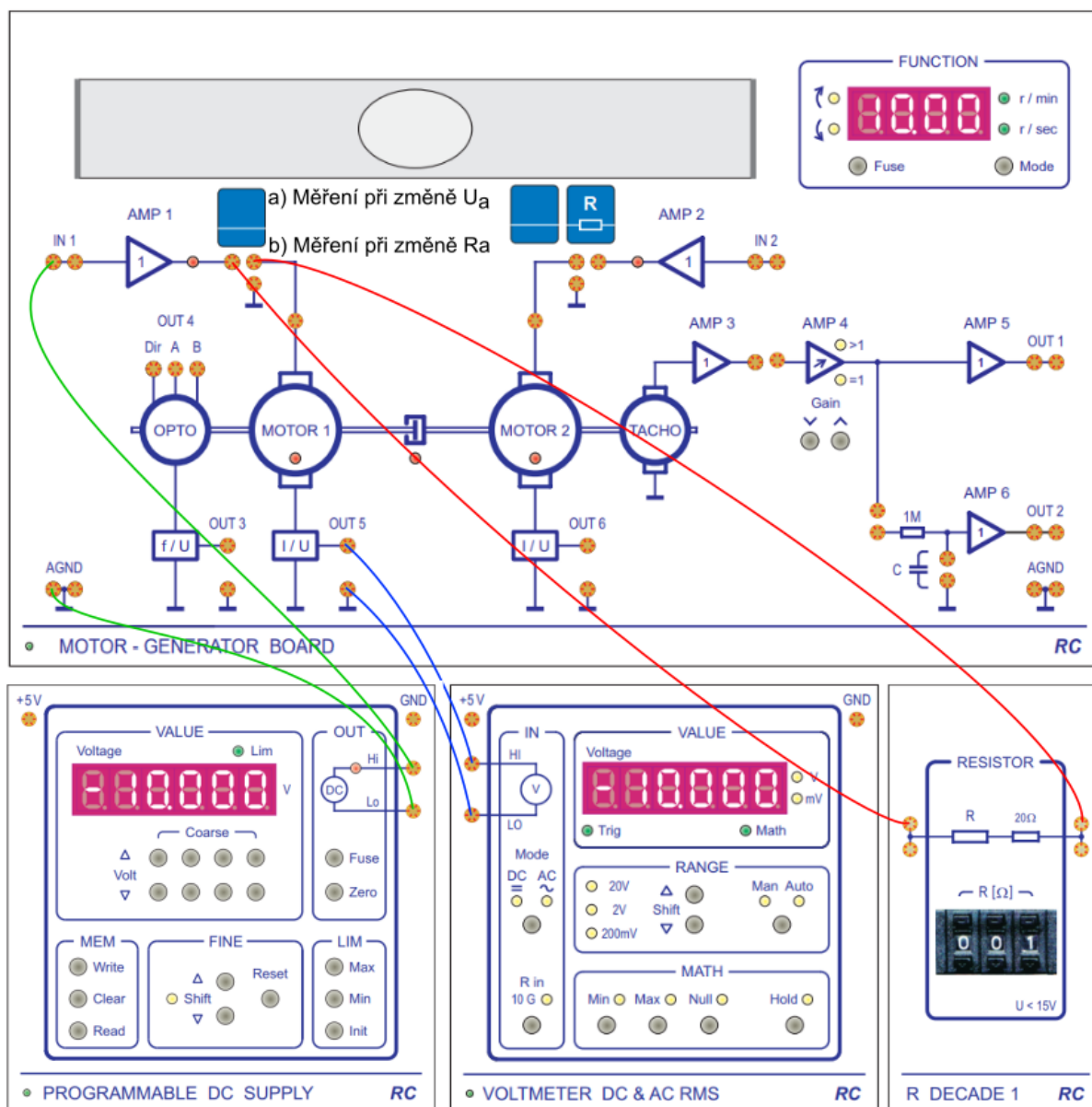
5.3 Vzor zadání laboratorní úlohy Motorgenerátor

Zadání:

Změřte a zobrazte mechanické charakteristiky stejnosměrného motoru s permanentními magnety v případech:

1. Při řízení otáček změnou napájecího napětí U_a (8, 6 a 4 V).
2. Při řízení otáček změnou odporu kotvy R_a (+0, +20, +50 a +100 Ω), $U_a = 8$ V.

Schéma zapojení:



Obr. 22 Schéma zapojení laboratorní úlohy Motorgenerátor

Postup měření:

Pro měření mechanických charakteristik při změně napájecího napětí U_a zapojte obvod podle schématu. Do obvodu kotvy motoru 1 však nezařazujte odporovou dekádu, ale volné svorky propojte vodivou spojkou. Na DC zdroji nastavte napětí 8 V a ujistěte se, že obvod kotvy motoru 2 je rozpojený. Motor nyní běží bez zátěže, запиšte si otáčky soustrojí zobrazené na modulu motorgenerátoru a hodnotu napětí změřené na převodníku proud/napětí v obvodu kotvy motoru 1. Převodník I/U má konstantu 5 mV/1 mA. Nyní mezi volné svorky v obvodu kotvy motoru 2 zapojte postupně rezistor 100 Ω , rezistor 10 Ω a vodivou spojkou a pro každý zapojený prvek opět odečtěte otáčky soustrojí a proud kotvy motoru 1. Tento postup zopakujte pro napětí napájecí napětí 6 a 4 V. Ze zadaného napětí a příslušných otáček naprázdno vypočítejte konstantu $c\phi$ a pomocí ní a naměřených hodnot vypočítejte moment.

Pro měření mechanických charakteristik při změně kotevního odporu R_a nejprve změřte při napětí 8 V, které bude při celém tomto měření konstantní stejné parametry jako v předchozím měření při nezatíženém motoru a při zapojení 100 a 10 Ω do obvodu kotvy motoru 2, odpor kotvy motoru 1 je zatím beze změny. Nyní do obvodu kotvy motoru 1 v místě, kde byla v předchozím měření vodivá spojka, zapojte odporovou dekádu a zopakujte stejná měření, ale nyní měřte při změně hodnoty odporu kotvy motoru 1 o +20, +50 a +100 Ω . Opět vypočítejte moment.

Z naměřených a vypočítaných hodnot zobrazte mechanické charakteristiky při změně napájecího napětí a při změně odporu kotvy.

5.4 Vypracování laboratorní úlohy Motorgenerátor

Tab. 11 Naměřené hodnoty při změně napájecího napětí U_a

$U_a = 8 \text{ V}$				
$R_z (\Omega)$	n	$U_I (\text{V})$	$I_a (\text{mA})$	$M (\text{mNm})$
∞	4865	0,089	17,8	0,279
100	4550	0,375	75	1,178
10	3500	1,295	259	4,066
0	2710	1,938	387,6	6,085
$U_a = 6 \text{ V}$				
$R_z (\Omega)$	n	$U_I (\text{V})$	$I_a (\text{mA})$	$M (\text{mNm})$
∞	3658	0.080	16	0.251
100	3403	0.298	59.6	0.936
10	2604	0.995	199	3.124
0	2035	1.485	297	4.663
$U_a = 4 \text{ V}$				
$R_z (\Omega)$	n	$U_I (\text{V})$	$I_a (\text{mA})$	$M (\text{mNm})$
∞	2436	0.072	14.4	0.226
100	2265	0.217	43.4	0.681
10	1730	0.683	136.6	2.145
0	1348	1.010	202	3.171

Tab. 12 Naměřené hodnoty při změně odporu kotvy R_a

$R_a + 0 \Omega$				
$R_z (\Omega)$	n	$U_I (\text{V})$	$I_a (\text{mA})$	$M (\text{mNm})$
∞	4885	0,089	17,8	0,279
100	4551	0,379	75,8	1,190
10	3490	1,311	262,2	4,117
$R_a + 20 \Omega$				
$R_z (\Omega)$	n	$U_I (\text{V})$	$I_a (\text{mA})$	$M (\text{mNm})$
∞	4660	0,086	17,2	0,270
100	3805	0,324	64,8	1,017
10	2080	0,801	160,2	2,515
$R_a + 50 \Omega$				
$R_z (\Omega)$	n	$U_I (\text{V})$	$I_a (\text{mA})$	$M (\text{mNm})$
∞	4360	0,081	16,2	0,254
100	3023	0,267	53,4	0,838
10	1260	0,508	101,6	1,595
$R_a + 100 \Omega$				
$R_z (\Omega)$	n	$U_I (\text{V})$	$I_a (\text{mA})$	$M (\text{mNm})$
∞	3882	0,080	16	0,251
100	2186	0,206	41,2	0,647
10	710	0,316	63,2	0,992

Příklad výpočtu

Výpočet konstanty motoru:

$$c\Phi = \frac{U_a}{\omega_0} = \frac{8}{\frac{2\pi \cdot 4865}{60}} = 0,0157 \text{ V} \cdot \text{s}$$

Výpočet proudu kotvy I_a z převodníku I/U

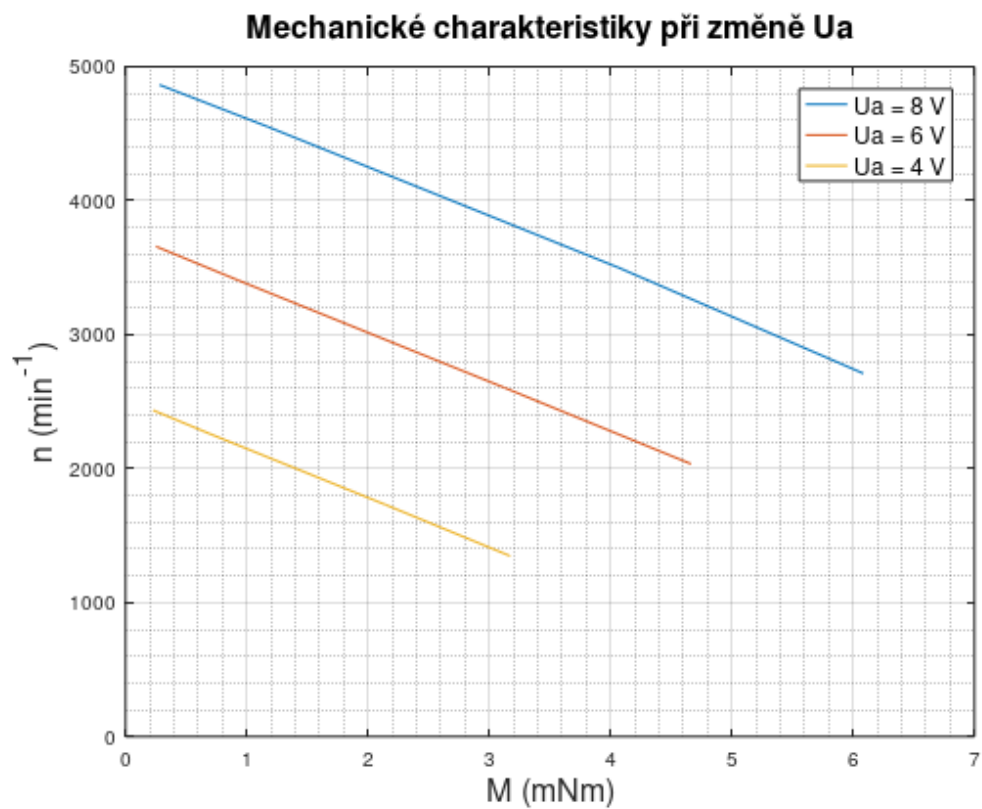
$$I_a = U_I \cdot k_I = 0,089 \cdot 0,2 = 17,8 \text{ mA}$$

Výpočet momentu

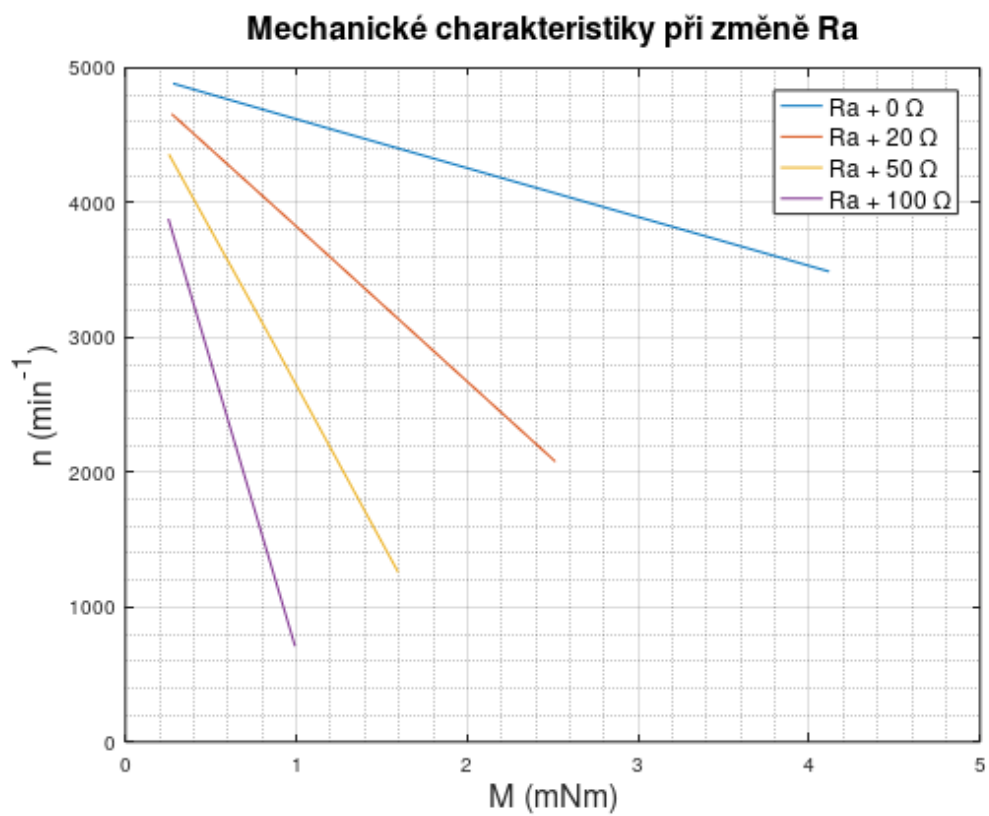
$$M = c\Phi \cdot I_a = 0,0157 \cdot 17,8 = 0,279 \text{ mNm}$$

Závěr

Změřil jsem a zobrazil mechanické charakteristiky při změně napájecího napětí U_a a při změně odporu kotvy R_a . Průběhy mechanických charakteristik při změně napětí odpovídají teorii. Při změně odporu kotvy se mění hodnota otáček naprázdno vlivem úbytku napětí na zařazeném rezistoru. Například v případě zařazení odporu o hodnotě 20Ω do obvodu kotvy a chodu bez zatížení na něm vzniká úbytek $0,344 \text{ V}$. Motor je tak napájen napětím $7,656 \text{ V}$ čemuž výpočtem odpovídají otáčky naprázdno 4656 min^{-1} . Změřené otáčky jsou při tomto stavu 4660 min^{-1} . Změřené mechanické charakteristiky jsou zobrazeny na obrázcích 23 a 24.



Obr. 23 Změřené mechanické charakteristiky při změně napájecího napětí U_a



Obr. 24 Změřené mechanické charakteristiky při změně odporu kotvy R_a

6 Závěr

Cílem práce bylo vytvoření laboratorní úlohy Transformátor a rozšíření laboratorní úlohy Motorgenerátor. Obě dvě úlohy se zadáním lze využít k výuce.

Teoretický rozbor pro účely měření laboratorní úlohy Transformátor využívá zákon elektromagnetické indukce k odvození napěťových rovnic transformátoru, a Ampérův zákon pro odvození vztahu mezi magnetickou indukcí a intenzitou magnetického pole a zavedení pojmu magnetická susceptibilita. První část praktické části této úlohy spočívá v měření dynamických hysterezních křivek magnetického materiálu, který tvoří magnetický obvod měřeného modulu transformátoru, a pozorování změn parametrů dynamické hysterezní smyčky při různých hodnotách napájecího napětí. Druhá část úlohy se zabývá měřením magnetizační amplitudové charakteristiky magnetického materiálu magnetického obvodu, určení závislosti amplitudové permeability na velikosti intenzity magnetického pole a určení počáteční a maximální amplitudové permeability. Amplitudová permeabilita je významný parametr při posuzování magnetických vlastností jader magnetických obvodů.

Rozšíření laboratorní úlohy Motorgenerátor spočívalo ve vytvoření další laboratorní úlohy využívající modul motorgenerátoru, který byl již důkladně zpracován v bakalářské práci pana Tomáše Mičky v roce 2018. Výstupem rozšíření laboratorní úlohy Motorgenerátor jsou změřené a zobrazené mechanické charakteristiky prvního stejnosměrného motoru s permanentními magnety při řízení otáček změnou napětí nebo změnou odporu kotvy. Druhý stejnosměrný motor s permanentními magnety v soustavě motorgenerátor byl využit jako pracovní mechanismus (generátor) s proměnou zátěží.

Měření byla provedena na modulech, které jsou svým provedením, velikostmi elektrického napětí a proudu a dosahovanými výkony určeny pro výukové účely. Další směřování práce by tak mohlo využít uvedené teoretické a praktické poznatky, a aplikovat je při měření na konkrétních silnoproudých zařízeních.

Literatura

- [1] ČERMÁK, Tomáš a KEPPERT, Svetozar. *Elektrické stroje. I, Transformátory*. 2. vyd. Ostrava: Vysoká škola báňská, 1984. Skripta. Vysoká škola báňská v Ostravě.
- [2] PETROV, G. N. *Elektrické stroje I: Úvod - transformátory*. Přeložil Břetislav BENDA. Praha: Academia, 1980.
- [3] SEDLÁK, Bedřich a Ivan ŠTOLL. *Elektřina a magnetismus*. 3. vyd. Praha: Karolinum, 2012. ISBN 978-80-246-2198-2.
- [4] FAKTOR, Zdeněk. *Transformátory a cívky*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 1999. ISBN 80-86056-49-X.
- [5] DRÁPALA, Jaromír a Miroslav KURSA. *Elektrotechnické materiály*: [CD-ROM]. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2012. ISBN 978-80-248-2570-0.
- [6] BIČOVSKÁ, Blanka. *Elektrická měření* [CD-ROM]. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2007. ISBN 978-80-248-1480-3.
- [7] NEBORÁK, Ivo a Václav SLÁDEČEK. *Elektrické pohony* [CD-ROM]. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2007. ISBN 978-80-248-1493-3.
- [8] Výukový systém rc2000 – μ LAB, Moduly. RC DIDACTIC SYSTEMS
Dostupné z: https://docs.wixstatic.com/ugd/947612_0af889c9bf6d437ab15db498405ebe11.pdf
[cit. 2019-04-10].

Obrázky

- [Obr. 8] Výukový systém rc2000 – μ LAB, Moduly. RC DIDACTIC SYSTEMS
Dostupné z: https://docs.wixstatic.com/ugd/947612_0af889c9bf6d437ab15db498405ebe11.pdf
[cit. 2019-04-10].
- [Obr. 9] Výukový systém rc2000 – μ LAB, Moduly. RC DIDACTIC SYSTEMS
Dostupné z: https://docs.wixstatic.com/ugd/947612_0af889c9bf6d437ab15db498405ebe11.pdf
[cit. 2019-04-10].
- [Obr. 10] Výukový systém rc2000 – μ LAB, Moduly. RC DIDACTIC SYSTEMS
Dostupné z: https://docs.wixstatic.com/ugd/947612_0af889c9bf6d437ab15db498405ebe11.pdf
[cit. 2019-04-10].
- [Obr. 18] Výukový systém rc2000 – μ LAB, Moduly. RC DIDACTIC SYSTEMS
Dostupné z: https://docs.wixstatic.com/ugd/947612_0af889c9bf6d437ab15db498405ebe11.pdf
[cit. 2019-04-10].
- [Obr. 19] Výukový systém rc2000 – μ LAB, Moduly. RC DIDACTIC SYSTEMS
Dostupné z: https://docs.wixstatic.com/ugd/947612_0af889c9bf6d437ab15db498405ebe11.pdf
[cit. 2019-04-10].
- [Obr. 20] Výukový systém rc2000 – μ LAB, Moduly. RC DIDACTIC SYSTEMS
Dostupné z: https://docs.wixstatic.com/ugd/947612_0af889c9bf6d437ab15db498405ebe11.pdf
[cit. 2019-04-10].
- [Obr. 21] Výukový systém rc2000 – μ LAB, Moduly. RC DIDACTIC SYSTEMS
Dostupné z: https://docs.wixstatic.com/ugd/947612_0af889c9bf6d437ab15db498405ebe11.pdf
[cit. 2019-04-10].